

Escuela de Ingeniería de Barcelona Este

Departamento de Mecánica de Fluidos

Trabajo final de grado

Estudio experimental y
computacional del flujo en un eyector
para su uso como sistema de
recirculación en pilas de combustible
tipo PEM



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Autor: Arnau Gràcia Calvo

Tutor: Ricardo Torres Cámara

Barcelona, 4 de junio de 2019

Resumen

Uno de los aspectos más importantes a la hora de intentar acercar la tecnología de las pilas de hidrógeno al mundo cotidiano es el estudio de los sistemas de alimentación y recirculación de hidrógeno para la pila. El uso de eyectores en esta tarea supone una de las soluciones más eficaces, ya que son elementos muy fiables y sencillos capaces de realizar las tareas de alimentación y recirculación con un único sistema.

El objetivo de este trabajo se ha centrado en intentar obtener un modelo computacional en COMSOL Multiphysics capaz de predecir con ciertas garantías el comportamiento de un eyector. Para intentar validar dichas simulaciones se cuenta con un eyector real montado en el laboratorio de pilas de combustible del IRI (Institut de Robòtica i Informàtica Industrial), gracias al cual podremos contrastar experimentalmente las simulaciones. Durante el trabajo se realizarán distintas mejoras en el modelo, en función de los resultados que se obtengan.

Los resultados finales muestran un gran parecido entre los datos computacionales y experimentales, a excepción del caudal de realimentación, donde el modelo sobreestima los valores experimentales en un 45%. Lo más destacable es que se ha logrado que el modelo mantenga esa sobreestimación constante en condiciones de operación distintas, por lo que se pueden corregir las simulaciones con un factor multiplicador.

Resum

Un dels aspectes més importants a l'hora de mirar d'apropar la tecnologia de les piles d'hidrogen al món quotidià és l'estudi dels sistemes d'alimentació i recirculació d'hidrogen per a la pila. L'ús d'eyectors en aquesta tasca suposa una de les solucions més eficaces, ja que són elements molt fiables i senzills capaços de dur a terme les tasques d'alimentació i recirculació amb un únic sistema.

Aquest treball s'ha enfocat a intentar obtenir un model computacional mitjançant el programa COMSOL Multiphysics que sigui capaç de preveure amb certes garanties el comportament d'un eyector. Per mirar de validar aquestes simulacions es disposa d'un eyector real muntat al laboratori de pilas de combustible de l'IRI (Institut de Robòtica i Informàtica Industrial), gràcies al qual podrem contrastar experimentalment les simulacions. Durant el treball es faran diverses millores en el model, en funció dels resultats que s'obtinguin.

Els resultats finals mostren una gran similitud entre les dades computacionals i les experimentals, a excepció del cabal de realimentació, en què el model sobreestima els valors experimentals en un 45%. El fet més destacable ha estat aconseguir que el model mantingui aquesta sobreestimació constant en condicions d'operació diferents, per la qual cosa es poden corregir les simulacions amb un factor multiplicador.

Abstract

Studying the hydrogen supply and recirculation systems for fuel cells is one of the most relevant aspects in order to bring fuel cell technology to the everyday world. Using ejectors in these tasks is one of the most efficient solutions, as they are simple and really reliable devices because they are able to carry out both the supply and the recirculation tasks using one single system.

The main objective of this project was to develop a computational model able to predict the performance of an ejector using COMSOL Multiphysics. So as to validate these simulations, we used a real ejector in the fuel cell laboratory of IRI (Institut de Robòtica i Informàtica Industrial), which gave us the opportunity to verify the simulations with experimental data. During this project various modifications have been made in order to bring computational results closer to the experimental ones.

Final results show really good similarity between experimental and computational data, except for the secondary mass flow rate, in which the computational model overestimates experimental values by 45%. The most remarkable achievement has been keeping this overestimation constant under different operating conditions, so these simulations can be fixed using a multiplier factor.

Agradecimientos

Me gustaría dar las gracias en primer lugar a mi tutor Ricardo Torres Cámara, por haberme hecho posible este trabajo en el que he aprendido tanto acerca del mundo de la investigación, y por haberme servido de inspiración para este proyecto en asignaturas como “Ingeniería de Fluidos” o “Simulación Computacional en Mecánica de Fluidos y Transferencia del Calor”, donde aprendí las bases de los conocimientos que he utilizado y ampliado en este trabajo.

Por otra parte también me gustaría agradecer la ayuda de Vicente Roda en este proyecto, pues sin él hubiera sido imposible llevar a cabo los experimentos, y además nos ha ayudado a Ricardo y a mí a la hora de analizar resultados, y en momentos de toma de decisiones.

Quisiera también agradecer y congratular la labor tanto de Xavier Corbella Coll, como de Luca Volpato, que en sus respectivos trabajos de final de grado ^[11, 12] iniciaron y perfeccionaron el estudio del eyector objeto del presente trabajo, sentando buena parte de las bases de las cuales ha podido partir éste proyecto. También me gustaría dar las gracias a Alejandro Cifuentes, quien nos ayudó a encontrar un pequeño problema en el modelo.

Finalmente quisiera agradecer al Departamento de Mecánica de Fluidos de la Escola d’Enginyeria de Barcelona Est de la Universitat Politècnica de Catalunya, por proveerme de los recursos computacionales necesarios para llevar a cabo las simulaciones, y al Laboratorio de Pilas de Combustible, en el Departamento de Control Industrial del Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas, por hacer posibles los experimentos de este trabajo.

Índice

Resumen	2
Resum	3
Abstract	3
Agradecimientos	4
Índice	5
Lista de figuras	8
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Motivación	12
1.2 Objetivos	13
2. PILAS DE HIDRÓGENO	15
2.1 Introducción	15
2.2 Funcionamiento	15
2.3 Tipos de pilas	16
2.4 Características de las PEMFC	17
2.4.1 Sobrante de hidrógeno	17
2.4.2 Humidificación de la membrana	18
3. FLUJO COMPRESIBLE	19
3.1 Numero de Mach	19
3.2 Velocidad del sonido	19
3.3 Derrame estacionario	20
4. EYECTORES	22
4.1 Toberas	22
4.1.1 Tobera convergente	22
4.1.2 Tobera convergente-divergente	23
4.2 Introducción a los eyectores	24
4.3 Uso en las pilas de combustible	25
4.4 Propiedades de los eyectores	26
4.4.1 Modos de funcionamiento	26
4.4.2 Fases del fluido	27
4.5 Simulación de eyectores en CFD	28
4.5.1 Número de dimensiones	28
4.5.2 Modelo de turbulencia	29

4.5.3 Mallado.....	29
4.5.4 Condiciones de contorno	30
5. EQUIPO EXPERIMENTAL.....	32
5.1 Layout experimental.....	32
5.1.1 Eyector.....	32
5.1.2 Sistema de alimentación y recogida de datos	33
5.2 Funcionamiento del sistema	35
5.3 Procedimiento experimental	36
5.4 Post-procesado.....	37
6. MODELO DE CFD.....	38
6.1 Introducción	38
6.1.1 Software	38
6.1.2 Modelo previo	38
6.2 Configuración	38
6.2.1 Geometría	39
6.2.2 Modulo de mecánica de fluidos.....	41
6.2.3 Mallado.....	42
6.2.4 Estudio.....	44
6.2.5 Resultados	45
6.3 Simulación.....	46
7. EXPERIMENTOS	48
7.1 Introducción	48
7.2 Tandas.....	48
7.2.1 Tanda #1	48
7.2.2 Tanda #2	49
7.2.3 Tanda #3	49
7.3 Pruebas	50
7.3.1 Prueba sin cámara de succión	50
7.3.2 Prueba diámetro de garganta.....	51
8. RESULTADOS	52
8.1 Introducción	52
8.2 Configuración de 1 entrada.....	52
8.2.1 Resultados tanda #1	52
8.2.2 Hipótesis tanda #1	53
8.2.3 Resultados prueba diámetro de garganta tanda #1	55
8.3 Configuración de 2 entradas	56
8.3.1 Resultados tanda #2	56

8.3.2 Hipótesis tanda #2	58
8.3.3 Resultados prueba diámetro de garganta tanda #2	59
8.3.4 Resultados tanda #3	60
8.3.5 Hipótesis tanda #3	62
8.4 Simulaciones fallidas	62
 9. CONCLUSIONES	 66
9.1 Conclusiones	66
9.2 Trabajos futuros	67
 Anexo A: Material experimental	 71
Anexo B: Planos del eyector	73
Referencias	80

Lista de figuras

Fig. 2.1: Esquema de una pila de combustible de tipo PEM [Handige (wikipedia) 2008].....	15
Fig.4.1: Comportamiento de una tobera convergente: (a) vista lateral “esquemática” de la tobera; (b) presiones a lo largo de la tobera; (c) caudal másico en función de la relación de presiones [White 2016]	22
Fig.4.2: Comportamiento de una tobera convergente-divergente: (a) vista lateral “esquemática” de la tobera; (b) presiones a lo largo de la tobera; (c) caudal másico en función de la relación de presiones [White 2016]	23
Fig. 4.3: Esquema interno de un eyector. [Besagni 2015]	24
Fig. 4.4: Visualización de los modos de funcionamiento de un eyector con tobera convergente. En el eje y visualizamos los caudales primario y secundario. En el eje x representamos una presión primaria “genérica”, manteniendo la presión de secundario y de salida constantes. [Zhu 2009]	26
Fig. 4.5: Eyector simulado con geometría 2D axisimétrica. [COMSOL Multiphysics 2017]	28
Fig. 4.6: Refinado de la malla en las zonas de interés. [Li 2010].....	30
Fig. 5.1: Vista en sección del diseño del eyector. En rojo se han señalado los caudales. [Corbella 2015]	32
Fig. 5.2: Zoom de la geometría interna del eyector. [Corbella 2015]	33
Fig. 5.3: Montaje experimental: vista general.	33
Fig. 5.4: Montaje experimental: en rojo está marcado el nombre de cada dispositivo; en amarillo, una flecha que señala aguas arriba del caudal 1, dónde se encuentran ubicados todos los dispositivos que no aparecen en la imagen pero sí en el esquema.	34
Fig. 5.5: Esquema del montaje experimental. Los nombres de cada dispositivo se vinculan con los de la fig. 5.4.....	34
Fig. 6.1: Geometría del eyector del modelo. Aspecto exterior en la izquierda y vista de sección a la derecha.	39
Fig. 6.2: Vista lateral seccionada del eyector, con algunos apuntes esquemáticos.	39
Fig. 6.3: Plano de revolución. Las flechas representan el eje de revolución.	40
Fig. 6.4: Vista con transparencia del eyector. En azul están destacadas las superficies "restantes" del plano de revolución.	40
Fig. 6.5: Eyector, cara de salida. En la izquierda vemos la anomalía causada en la malla al mantener los planos de simetría, a la derecha la misma malla con el problema corregido.	41
Fig. 6.6: De derecha a izquierda: entrada primaria, entrada secundaria, y salida (superficies destacadas en azul).	42
Fig. 6.7: Malla #1, aspecto exterior.	43
Fig. 6.8: Malla #2, aspecto exterior.	43

Fig. 6.9: Una de las mallas gruesas. Podemos apreciar como carece de mallado de capa límite.	44
Fig. 6.10: En la izquierda: grafica de colores con el número de Ma; a la derecha líneas de corriente a través del eyector.	46
Fig. 6.11: Captura de pantalla de WinSCP. A la izquierda vemos los archivos presentes en el ordenador doméstico; a la derecha tenemos los archivos presentes en el clúster.	46
Fig. 6.12: Captura de pantalla de PuTTY. En la pantalla negra escribimos los comandos.	47
Fig. 7.1: Geometría del eyector con la cámara de succión anulada. En azul están destacadas las caras que pasaron a actuar como paredes.	50
Fig. 7.2: Número de Ma representado mediante colores a lo largo de un plano 2D. A la derecha, en el difusor, podemos apreciar una importante anomalía fruto de algún fallo en la simulación.	51
Fig. 8.1: Tanda #1, configuración de 1 entrada. Se representa el caudal másico en función de la relación de presiones entre la entrada y la salida. Todas las presiones son absolutas. Las líneas discontinuas corresponden a los datos de las simulaciones, y las líneas continuas corresponden a los datos experimentales. Cada color se corresponde con un valor distinto de presión de entrada.	53
Fig. 8.2: Prueba de cambio de garganta, aplicada a la tanda #1. Se representa el caudal másico en función de la relación de presiones. Todas las presiones son absolutas. En naranja tenemos los datos "originales" de la gráfica anterior, en rojo tenemos los datos con la garganta modificada.	55
Fig. 8.3: Tanda #2, configuración de 2 entradas. Se representan los caudales másicos primario (en azul) y secundario (en rojo) en el eje vertical izquierdo, y el ratio de succión (en verde) en el eje vertical derecho, todos en función de la presión P_1 . Todas las presiones son absolutas. Las líneas continuas corresponden a los datos experimentales y las discontinuas a los simulados.	57
Fig. 8.4: Prueba de cambio de garganta, aplicada a la tanda #2. Las leyendas, los datos, y los ejes son los mismos que en la tanda #2, pero los colores azul oscuro, granate, y verde oscuro se corresponden con las simulaciones de garganta modificada. Todas las presiones son absolutas.	60
Fig. 8.5: Tanda #3, configuración de 2 entradas. Las líneas continuas se corresponden con los resultados experimentales, y las discontinuas con los resultados de COMSOL. Se representan los caudales másicos primario (en azul) y secundario (en rojo) en el eje vertical izquierdo, y el ratio de succión (en verde) en el eje vertical derecho, todos en función de la presión de salida. Todas las presiones son absolutas.	61
Fig. 8.6: Resultados típicos obtenidos en una simulación errónea correspondiente a la situación 1. En la imagen superior tenemos el número de Mach y en la imagen inferior la temperatura en $^{\circ}\text{C}$.	63
Fig. 8.7: Resultados típicos obtenidos en una simulación errónea correspondiente a la situación 2. En la imagen superior tenemos el número de Mach, y en la imagen inferior la temperatura en $^{\circ}\text{C}$.	64

Fig. A.1 Tabla con la información más detallada de todos los accesorios utilizados en el equipo experimental.	72
Fig. B1. Vista en sección del eyector. En rojo se muestran las distintas partes del eyector. [Corbella 2015]	73
[9] Y. Zhu, Y. Li “New theoretical model for convergent nozzle ejector in the proton exchange membrane fuel cell system”. Journal of Power Sources 191 (2009) 510–519.	80



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El crecimiento de la demanda energética que se prevé para las próximas décadas, motivado por un gran aumento de la población mundial y por el desarrollo de nuevas potencias emergentes, junto con la escasez de petróleo y las preocupaciones medioambientales que conlleva su uso como fuente de energía, impulsan cada día más el desarrollo de las fuentes de energía renovables, como las pilas de hidrógeno.

Las pilas de hidrógeno son dispositivos capaces de obtener energía eléctrica a base de consumir hidrógeno y oxígeno. Una de las ventajas de estos sistemas es que el residuo principal que emiten es agua, por lo que no contaminan ni afectan a la capa de ozono. Además las pilas convierten directamente la energía química del hidrógeno y el oxígeno en electricidad, ahorrándose cualquier proceso intermedio, y logrando así una gran eficiencia.

La principal ventaja del hidrógeno es que, al igual que muchos combustibles fósiles, resulta relativamente fácil de almacenar, y posee una gran densidad de energía, pero a diferencia de éstos se puede usar para producir electricidad de forma directa y sin emitir contaminantes, generalmente con una eficiencia bastante superior.

Una de las dificultades de estos sistemas reside en la obtención del hidrógeno, que requiere más energía para ser separado del resto de componentes que lo acompañan que la que acaba aprovechándose de su reacción. Sin embargo, se pueden usar placas solares fotovoltaicas para separar mediante electrólisis el hidrógeno del oxígeno en el agua (H_2O), por lo que la energía empleada en esa separación también proviene de fuentes renovables, y todo el proceso desde la separación de hidrógeno en el agua, su utilización en la pila, y la obtención de agua de nuevo, puede llevarse a cabo sin emisiones de CO_2 , y sin dependencia de combustibles fósiles.

Las pilas se suelen abastecer con un caudal excesivo de hidrógeno (por razones que veremos en el apartado 2.4), parte del cual no es consumido. Si este caudal sobrante se desecha a la atmósfera se está incurriendo en una pérdida energética importante, y se reduce la eficiencia del sistema. Además puede conllevar algunos peligros ya que es un gas inflamable. Por este motivo, en la mayoría de sistemas de pilas de un cierto calibre, lo que se hace es recircular este caudal sobrante de nuevo a la entrada.

Para llevar a cabo la recirculación existen dos opciones principales, la primera de las cuales consiste en simplemente añadir un compresor que mueva el caudal sobrante a un punto donde se encuentre con el caudal de entrada. Sin embargo esta opción supone montar un sistema adicional que consumirá un nuevo tipo de energía, y que introducirá un punto de complejidad adicional en el sistema.

La otra opción para recircular el caudal es usar un eyector, que aprovecha parte de la energía del caudal primario para generar un vacío que succione el caudal sobrante y lo mezcle con el

caudal de entrada otra vez. De esta manera también se consume energía, pero dicha energía proviene de la misma fuente que alimenta al caudal de entrada, es decir, de la presión del gas, por lo que no se introduce un subsistema adicional que tenga que alimentarlo. Además, es un dispositivo que funciona sin partes móviles, por lo que sus averías son muy poco frecuentes.

Dicho esto, cabe añadir que el hecho de que el eyector no tenga partes móviles hace que su diseño sea especialmente crítico, ya que una vez diseñado y montado no podrá cambiarse ninguna de sus características. Esto también hace que los eyectores deban diseñarse para funcionar con una pila en concreto, y pilas diferentes necesiten eyectores distintos.

Es por ello que resulta de gran utilidad tener una herramienta de simulación con la cual se puedan diseñar y evaluar el comportamiento de distintos eyectores antes de escoger la opción definitiva. Simular el comportamiento de múltiples prototipos sin requerir de su fabricación física implica un considerable ahorro en la fase de desarrollo, y nos permite introducir cambios en el eyector y ver sus efectos con muy bajo coste económico.

En la presente memoria, empezaremos por hacer una introducción a la tecnología de las pilas de hidrógeno (tema 2), e introduciremos brevemente la mecánica de los flujos compresibles (tema 3), para poder así explicar el funcionamiento y las propiedades de los eyectores (tema 4). Hecho esto, procederemos a mostrar y explicar el equipo experimental del que disponemos (tema 5), y explicaremos las características del modelo de CFD utilizado (tema 6). Para terminar describiremos las tandas de experimentos que se han llevado a cabo (tema 7), visualizaremos los resultados y haremos algunas hipótesis (tema 8), y acabaremos extrayendo las conclusiones de dichos resultados (tema 9).

1.2 Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal la validación de un modelo computacional para un eyector.

Para poder validar el modelo se cuenta con un eyector real, que fue construido como parte del trabajo final de grado de Xavier Corbella Coll ^[1], el cual fue fabricado en el laboratorio de Ingeniería Mecánica de la ETSEIB (Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona), y que está montado en el Laboratorio de pilas de combustible, en el departamento de control industrial del IRI (Institut de Robòtica i Informàtica Industrial), en una estación ya preparada para la experimentación.

En el terreno computacional se parte de un modelo tridimensional réplica del eyector real realizado en COMSOL Multiphysics, que fue creado por Luca Volpato como parte de su trabajo final de grado ^[2], y al cual se le realizarán los cambios oportunos para intentar perfeccionarlo hasta lograr que ofrezca unos resultados lo más similares posibles a los del laboratorio.

En conclusión, el trabajo consistirá en preparar y llevar a cabo una serie de experimentos tanto en el laboratorio como en las simulaciones, contrastar ambas series de resultados, y

determinar qué cambios se pueden realizar para intentar acercar los resultados entre sí. Hecho esto el proceso volverá a arrancar de nuevo, y se repetirá de forma iterativa hasta que logremos obtener unos buenos resultados, o por lo menos hasta que sepamos de donde provienen las desviaciones y cómo podemos corregirlas.

Como objetivo adicional, una vez realizados los experimentos, se intentaran extraer algunas conclusiones acerca del comportamiento del eyector, y se intentara obtener una buena cantidad de información que resulte útil para la labor del laboratorio de pilas de combustible del IRI.

2. PILAS DE HIDRÓGENO

2.1 Introducción

Una pila de combustible es una máquina que convierte energía química en energía eléctrica, de forma similar a como lo haría una batería, pero con la diferencia de que su abastecimiento de energía es continuo y por lo tanto es capaz de funcionar de forma ilimitada mientras se le suministren los reactivos necesarios ^[3].

Las pilas de combustible, por lo tanto, guardan cierto parecido con los motores de combustión, en tanto que aprovechan la energía química de un fluido para realizar trabajo útil. No obstante las pilas resultan ser mucho más eficientes, con rendimientos de hasta un 60%, ya que no usan ningún proceso intermedio térmico ni mecánico (estos primeros limitados por la eficiencia de Carnot) para extraer la energía útil ^[3, 4]. Además son mucho más limpias, dado que la extracción de la energía se basa en una reacción de oxidación, en lugar de una combustión, por lo que se evitan los contaminantes propios de ésta.

2.2 Funcionamiento

Como veremos en el próximo punto, existen varios tipos de pilas de combustible, pero todas se basan en el mismo principio de funcionamiento. No obstante vamos a tomar como ejemplo más concreto una PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) para explicar su funcionamiento en detalle, dado que es uno de los tipos más comunes de pila, y en el que se centra nuestro estudio.

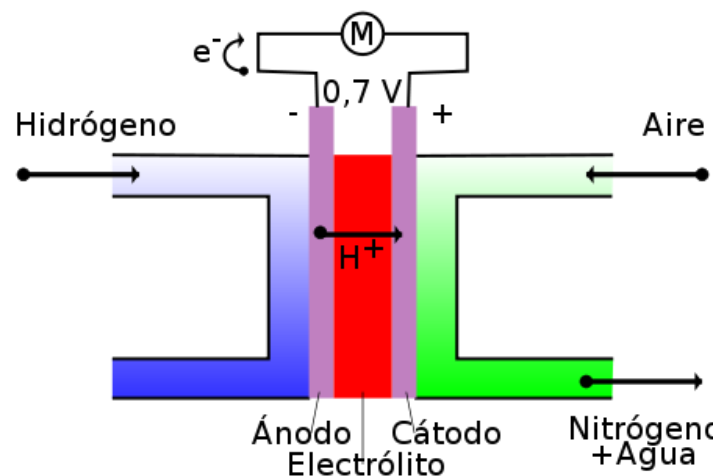
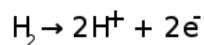


Fig. 2.1: Esquema de una pila de combustible de tipo PEM [Handige (wikipedia) 2008]

Como en cualquier batería convencional tenemos dos electrodos: el ánodo y el cátodo; entre medio tenemos un electrolito que los separa mecánica, eléctrica, y químicamente.

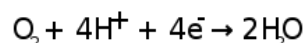
En la parte del ánodo se suministra el hidrógeno y, al entrar el gas en contacto con éste, se produce la reacción de oxidación, acelerada normalmente por el material del ánodo, que actúa como catalizador. Ésta reacción separa los electrones del hidrógeno, dejando iones positivos de hidrógeno libres (también llamados protones), según ^[4]:



A partir de este punto, entra en juego el tipo de electrolito de nuestra pila. En nuestro caso, como indica su nombre, las PEMFC tienen un electrolito que consiste en una membrana de intercambio de protones, es decir, una membrana que tan sólo permite el paso de los protones hacia el cátodo.

Los electrones por su parte no tienen más opción que viajar a través del circuito eléctrico que establecemos entre ánodo y cátodo, movidos por la carga positiva de los protones que hay en el cátodo. Es a través de este “viaje” que obtenemos la energía eléctrica útil de la pila ^[3].

Finalmente en el cátodo se suministra el oxígeno, a menudo en forma de aire, el cual se encuentra con los protones y los electrones, reaccionando para dar agua además del resto de componentes que tuviera el aire (mayormente nitrógeno), según la reacción de reducción:



Al igual que ocurría en el ánodo, esta reacción se suele ver acelerada por el material del cátodo, que actúa como catalizador.

En otros tipos de pilas esta “filtración” que hace el electrolito se produce de forma distinta, y se permite el paso del oxígeno del cátodo al ánodo, produciéndose entonces la reacción de reducción en el ánodo. No obstante en ningún caso podrán viajar los electrones a través del electrolito, pues su función es atravesar el circuito eléctrico hacia el cátodo.

2.3 Tipos de pilas

Todas las pilas de combustible usan el hidrógeno y el oxígeno como reactivos para la reacción de oxidación. A pesar de ello existen distintos tipos de pilas de combustible con distintos tipos de combustible (metanol, diésel...), y distintos tipos de oxidante (aire, oxígeno puro...). Es por esa razón que las pilas de combustible que funcionan con hidrógeno puro como combustible son las menos contaminantes, ya que sólo emiten agua como resultado, mientras que si usamos metanol o diésel, el resto de componentes que los conforman a parte del hidrógeno, se mantendrán como residuo después de la reacción.

Además del combustible utilizado, también podemos distinguir entre distintos tipos de pilas según el electrolito que usan y el material usado como catalizador. A continuación, una breve descripción de los diferentes tipos de pilas de combustible:

Proton Exchange Membrane (PEMFC): Las pilas de combustible de membrana de intercambio protónico, utilizan un polímero como electrólito, y platino como material catalizador. Este tipo de pilas suelen abastecerse de hidrógeno puro y de aire, y su principal campo de aplicación es el transporte (coches, aviones, submarinos...) ^[3].

Direct Methanol (DMFC): Estas pilas de combustible tienen una composición muy similar a las anteriores, ya que tienen el mismo tipo de membrana y catalizador. La principal diferencia que guardan con las anteriores es que usan metanol líquido como fuente de energía, un combustible más asequible y fácil de manejar. La desventaja principal de esto es que, tal como comentamos antes, todo aquel componente del metanol que no sea el hidrógeno, no puede aprovecharse, y queda como residuo. Se suelen usar en aplicaciones de pequeño tamaño (móviles, ordenadores...), con rendimientos bastante bajos ^[3].

Alcalinas (AFC): Las pilas de combustible alcalinas fueron unas de las primeras en ser implementadas, y se usaron en vehículos espaciales como generadores de electricidad y agua. La principal característica que tienen es que usan como electrólito una solución líquida de hidróxido de potasio en agua, en lugar de un polímero sólido ^[3].

Ácido Fosfórico (PAFC): Este tipo de pilas funcionan de manera muy similar a las de membrana de intercambio protónico, ya que su electrólito sólo permite el paso de protones, y también usan el platino como catalizador. La principal diferencia reside en que el electrólito es ácido fosfórico líquido. Comúnmente se usan como generadores de electricidad en edificios ^[3].

Carbonato Fundido (MCFC): Estas pilas funcionan con gas natural y biogás, y tienen un electrólito basado en carbonato fundido. Operan a muy alta temperatura (650 °C), lo cual les permite utilizar metales no preciosos como catalizadores, reduciendo su coste. Sus principales aplicaciones son industriales y militares ^[3].

Óxido Sólido (SOFC): Este tipo de pilas usan compuestos cerámicos como electrólito. Igual que las anteriores, pueden abastecerse de gas natural y biogás. Trabajan a muy altas temperaturas (800 - 1000 °C) y suelen usarse para aplicaciones industriales, e incluso en algunos trenes ^[3].

2.4 Características de las PEMFC

Para finalizar con este apartado comentaremos algunas de las particularidades de las pilas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC), que serán relevantes de cara al estudio del eyector.

2.4.1 Sobrante de hidrógeno

Una de las características de este tipo de pilas es que presentan varios problemas cuando se les suministra con la caudal exacto de hidrógeno que consumen, lo que se conoce como una mezcla estequiométrica.

Al igual que en un motor de combustión, cuando se suministra a la pila con la cantidad estequiométrica de combustible (hidrógeno), se incurre en el riesgo de que cualquier perturbación en el sistema desequilibre la mezcla, deteniendo la reacción y parando la pila. Esto se soluciona suministrando hidrógeno en exceso, garantizando así una reacción de oxidación completa.

Otra de las funciones de este exceso de hidrógeno es la de arrastrar consigo todas las impurezas que pueda traer el hidrógeno, que no se han consumido en la reacción, y se acumulan en los conductos, así como gotas de agua provenientes de la membrana. Todos estos agentes que se acumulan en la zona del ánodo reducen la concentración del reactante en la zona, provocando una considerable pérdida de rendimiento en la pila, por lo que ésta función del excedente de hidrógeno es de gran importancia para el sistema ^[5].

Para estudiar este exceso de caudal se suele usar una variable llamada estequiometría, la cual mide la relación entre el caudal de hidrógeno suministrado y el caudal de hidrógeno consumido:

$$\text{Estequiometría} = \frac{\dot{m}_{H_2 \text{ suministrado}}}{\dot{m}_{H_2 \text{ consumido}}} \quad \text{ec. 2.1}$$

2.4.2 Humidificación de la membrana.

Otra de las particularidades de las PEMFC es que su membrana de intercambio protónico debe mantenerse humidificada de forma continua para funcionar correctamente. De lo contrario la conductividad protónica de la membrana se reduce, y se puede agrietar, provocando así el contacto prematuro entre el hidrógeno y el oxígeno, que dañará la pila y reducirá su rendimiento. No obstante, un exceso de humedad puede hacer que los electrodos queden inundados de agua, impidiendo que desempeñen su función, pudiendo llegar al punto de detener la reacción.

En la membrana el contenido en agua se evapora continuamente, por lo que se le debe suministrar un caudal continuo de agua. Generalmente esto se hace mediante la humidificación previa de los gases, normalmente del aire (es decir, del oxígeno). De esta forma se puede lograr que los propios gases de alimentación provean a la membrana con el contenido en agua que pierde por evaporación.

Esta peculiaridad hace que el caudal sobrante de hidrógeno que hemos comentado en el punto anterior contenga una cierta humedad, debido a que arrastra una pequeña parte de agua que se pierde de la membrana hacia el ánodo. Éste contenido en agua puede alterar de manera notable las propiedades del fluido, especialmente si se dan unas condiciones en las que se produzca condensación del agua.

3. FLUJO COMPRESIBLE

3.1 Numero de Mach

Para entender los fenómenos y comportamientos de un eyector, antes vamos a tener que explicar la dinámica del flujo compresible. Para ello, lo primero que debemos definir es el número de Mach, el parámetro adimensional dominante en cualquier análisis de flujos compresibles ^[6].

$$Ma = \frac{c}{a} \quad \text{ec. 3.1}$$

Dónde c es la velocidad del flujo y a es la velocidad del sonido en el fluido de estudio, la cual definiremos en el próximo punto.

El número de Mach nos permite distinguir entre distintos tipos de flujo, en cuanto a su carácter compresible, según el valor que toma:

- **Ma < 0,3** → **Flujo incompresible**: El fluido sufre variaciones de densidad inapreciables.
- **Ma > 0,3** → **Flujo compresible**: El fluido sufre variaciones de densidad notables.

De esta forma, podríamos decir que un flujo es compresible cuando el número de Mach supera aproximadamente el valor de 0,3. No obstante, el número de Mach también nos permite otra clasificación de los flujos, tan importante como la anterior, en referencia a la presencia de ondas de choque:

- **Ma < 1** → **Flujo subsónico**: No hay presencia de ondas de choque.
- **Ma > 1** → **Flujo supersónico**: Aparecen las ondas de choque.

Cuando hablamos de flujos abiertos, esta clasificación referente a las ondas de choque va más allá, introduciendo los flujos hipersónicos y una región transónica alrededor de $Ma = 1$. No obstante en flujos internos (como es nuestro caso) basta con usar las dos clasificaciones anteriores.

3.2 Velocidad del sonido

Visto el número de mach y los tipos de flujo que nos permite distinguir, vamos a ver ahora qué es la velocidad del sonido y cómo se puede calcular.

La velocidad del sonido es la velocidad de propagación de un pulso infinitesimal de presión a través de un fluido en reposo ^[6], es decir, es la velocidad a la cual se propaga una onda sónica a través del medio de estudio (en nuestro caso un gas). Es una propiedad que no sólo depende de la composición del medio, sino también de su estado termodinámico.

El cálculo de la velocidad del sonido en un gas se obtiene de analizar el pulso infinitesimal de presión (onda sónica) antes mencionado:

$$a = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_S} \quad \text{ec. 3.2}$$

Dónde p es la presión, ρ la densidad y S indica que este es un proceso isentrópico.

Si consideramos además que nuestro gas se comporta como gas ideal, podemos simplificar la expresión, y nos queda:

$$a = \sqrt{\gamma R' T} \quad \text{ec. 3.3}$$

Donde R' es la constante específica del gas*, T es la temperatura, y γ es la relación de calores específicos**.

*La constante específica (R') es una constante termodinámica del gas, y se calcula como el cociente de la constante universal de los gases entre la masa molar del gas en cuestión:

$$R' = \frac{R}{M} \quad \text{ec. 3.4}$$

**La relación de calores específicos (γ) es una propiedad del gas de estudio, y se calcula como el cociente del calor específico a presión constante entre el calor específico a volumen constante:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad \text{ec. 3.5}$$

De esta forma, si consideramos el comportamiento de gas ideal, la velocidad del sonido pasa a depender únicamente de la temperatura del medio, una vez determinadas sus constantes R' y γ .

3.3 Derrame estacionario

Ahora que hemos introducido los aspectos más básicos del flujo compresible vamos a analizar el comportamiento de un derrame estacionario. Cuando hablamos de un derrame nos referimos a una zona del flujo en la cual no se produce ningún intercambio de calor ni trabajo, y en la cual los efectos gravitatorios también suelen ser despreciables. En estos casos, la única forma de alterar las propiedades del flujo es mediante la geometría, variando por ejemplo la sección de paso en la dirección del flujo.

Este es el caso de nuestro eyector, un dispositivo que pretende variar las propiedades del flujo primario para inducir un flujo secundario, tan solo mediante su geometría. Esto lo veremos más en detalle en el próximo capítulo.

Hipótesis

Lo primero que vamos a tener en cuenta es que el nuestro va a ser un estudio estacionario, por lo que el caudal másico (\dot{m}) se mantendrá constante:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot c = cte \quad \rightarrow \quad \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dc}{c} + \frac{dA}{A} = 0 \quad \text{ec. 3.6}$$

Dónde A es el área de paso, y c es la velocidad del flujo.

Por otra parte podemos aplicar el primer principio de la termodinámica a nuestro sistema estacionario, con las condiciones antes mencionadas (sin intercambio de calor ni energía y efectos gravitatorios despreciables):

$$h + \frac{c^2}{2} = cte \quad \rightarrow \quad dh + c \cdot dc = 0 \quad \text{ec.3.7}$$

Dónde h es la entalpía del gas.

Por último, igual que cuando definimos la velocidad del sonido, consideramos que éste es un proceso isentrópico, por lo que:

$$dh = \frac{dp}{\rho} \quad \text{ec. 3.8}$$

Si combinamos cuidadosamente las ecuaciones 3.2, 3.6, 3.7 y 3.8, y la definición del número de Mach (ec. 3.1), obtenemos la ecuación de derrame estacionario isentrópico:

$$\frac{dA}{A} = \frac{dc}{c} (Ma^2 - 1) \quad \text{ec.3.9}$$

Esta ecuación la utilizaremos en el próximo capítulo para predecir el comportamiento de las toberas, y explicar así el funcionamiento de los eyectores.

4. EYECTORES

4.1 Toberas

Antes de empezar con los eyectores en sí merece la pena hacer una breve introducción al funcionamiento de una tobera, pues es una parte fundamental en cualquier eyector, y ésta explicación nos va a ayudar a dar sentido a algunos de los fenómenos que veremos más adelante.

Una tobera es un dispositivo capaz de acelerar un fluido mediante un cambio en la sección de paso. Existen dos tipos de toberas: las toberas convergentes, y las toberas convergente-divergentes.

4.1.1 Tobera convergente

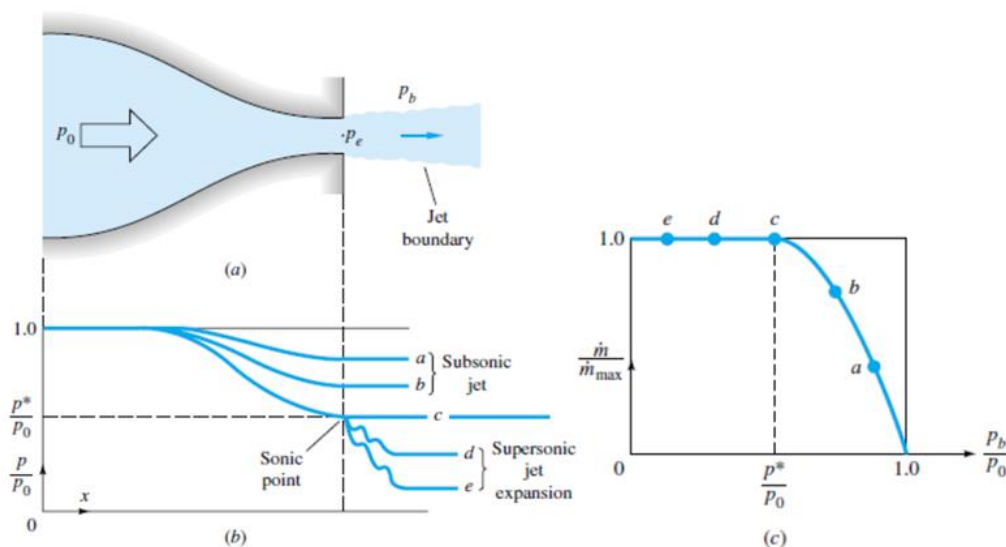


Fig.4.1: Comportamiento de una tobera convergente: (a) vista lateral “esquemática” de la tobera; (b) presiones a lo largo de la tobera; (c) caudal másico en función de la relación de presiones [White 2016]

Lo primero que debemos tener en cuenta es que para inducir el flujo a través de la tobera necesitamos una diferencia de presiones entre su salida y su entrada, tal que $P_0 > P_b$. De esta forma garantizamos que el fluido circula de izquierda a derecha, tal como indican las flechas. En esa dirección el área de paso se reduce a medida que avanzamos. Si además consideramos que en toda la tobera la velocidad es sub-sónica ($Ma < 1$), llegamos a la conclusión de que el fluido está aumentando su velocidad, según la ecuación 3.9. Si deseamos lograr un mayor aumento de velocidad tendremos que aumentar la diferencia de presiones, como ocurre entre los casos a y b de la figura 4.1.

Si seguimos aumentando la diferencia de presiones llegará un punto en el cual lograremos acelerar el fluido hasta la velocidad del sonido ($Ma = 1$), como ocurre en el caso c. De acuerdo con la ecuación 3.9 esta será la máxima velocidad que podremos lograr a la salida, pues si la velocidad alcanzase valores ligeramente por encima de la velocidad del sonido, entonces $Ma > 1$, y una reducción del área disminuye la velocidad en lugar de acelerarla, de tal forma que nos encontraríamos de nuevo por debajo de la velocidad del sonido.

Al haber llegado a la velocidad del sonido en un conducto cerrado se produce el bloqueo sónico, y el caudal másico alcanza su valor máximo, tal como se puede apreciar en la figura 4.1 (c). A partir de este punto, por mucho que aumentemos la diferencia de presiones, el caudal no aumentará (ver casos d y e).

4.1.2 Tobera convergente-divergente

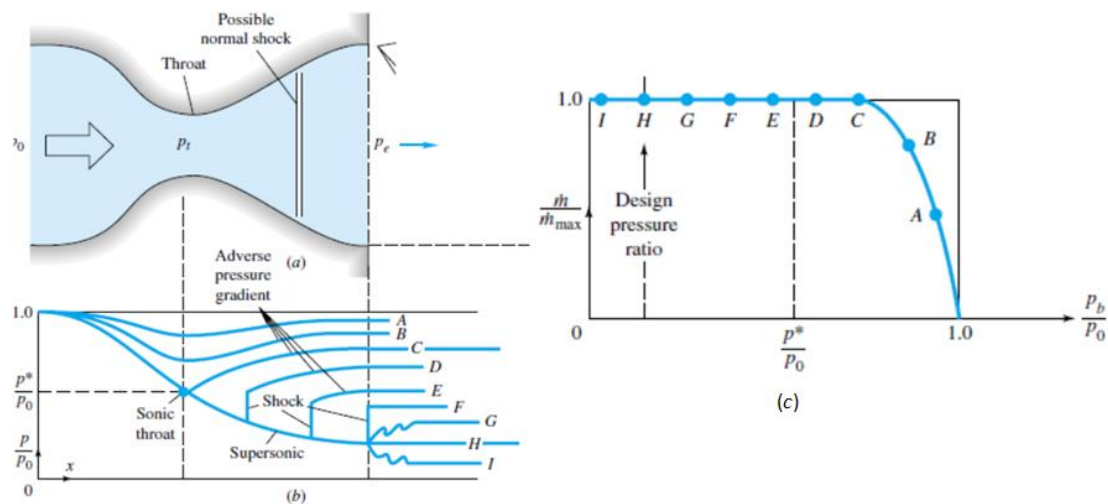


Fig.4.2: Comportamiento de una tobera convergente-divergente: (a) vista lateral "esquemática" de la tobera; (b) presiones a lo largo de la tobera; (c) caudal másico en función de la relación de presiones [White 2016]

Al igual que antes, comenzamos con una diferencia de presiones relativamente pequeña, tal que en ningún punto de la tobera alcanzamos la velocidad del sonido ($Ma < 1$). En este caso el primer tramo, siendo convergente, acelera el fluido, y el segundo tramo, por ser divergente lo frena (casos A y B).

Si seguimos aumentando la diferencia de presiones hasta las condiciones del caso C, logramos alcanzar condiciones sónicas en el punto más estrecho de la tobera (la garganta), y a partir de ahí nos encontramos con una sección divergente, que nos permitiría seguir acelerando el fluido. El problema es que las condiciones de presión en el caso C no le dan al flujo la suficiente energía como para seguir acelerando, e inmediatamente vuelve a velocidades sub-sónicas, actuando la parte divergente como un difusor, es decir, frenando el flujo.

En los casos siguientes (D, E y F) ocurre algo parecido, el fluido acelera hasta condiciones sónicas en la garganta, y sigue acelerando a velocidades supersónicas en la zona divergente, gracias a una mayor diferencia de presión, pero en algún punto de la zona divergente se queda

sin la energía suficiente para seguir acelerando, y el flujo se vuelve sub-sónico de forma violenta, mediante un fenómeno conocido como choque sónico.

Para evitar el choque sónico necesitamos una diferencia de presiones aún mayor, como ocurre en el caso H. Ahora el flujo logra mantenerse en condiciones supersónicas hasta más allá de la salida, y la tobera trabaja en condiciones de diseño.

Al igual que antes, en la figura 4.2 (c) podemos apreciar el bloqueo sónico que se produce nada más llegar a las condiciones C, es decir, siempre que tenemos un flujo sónico o supersónico. Éste caudal másico máximo, únicamente dependerá del área de paso en la garganta (parte más estrecha), del gas utilizado, y de las condiciones de remanso P_0 y T_0 .

4.2 Introducción a los eyectores

Un eyector es un dispositivo capaz de inducir el flujo de un fluido (flujo secundario) a partir de otro flujo (flujo primario), sin necesidad de incurrir en piezas móviles o en ninguna fuente de energía ajena ^[7].

Para lograrlo, se empieza por acelerar el flujo primario mediante una tobera, consiguiendo así reducir su presión. A continuación se descarga flujo primario en la cámara de succión, dónde se encuentra con el fluido secundario, induciendo en él movimiento por el efecto combinado de la baja presión, que lo succiona; y el esfuerzo cortante entre los dos fluidos, que hace que el primario arrastre al secundario (aunque el efecto más importante suele ser el de la succión). A continuación, ambos flujos se mezclan completamente, para acabar llegando al difusor, dónde se aumentará su presión y se reducirá su elevada velocidad.

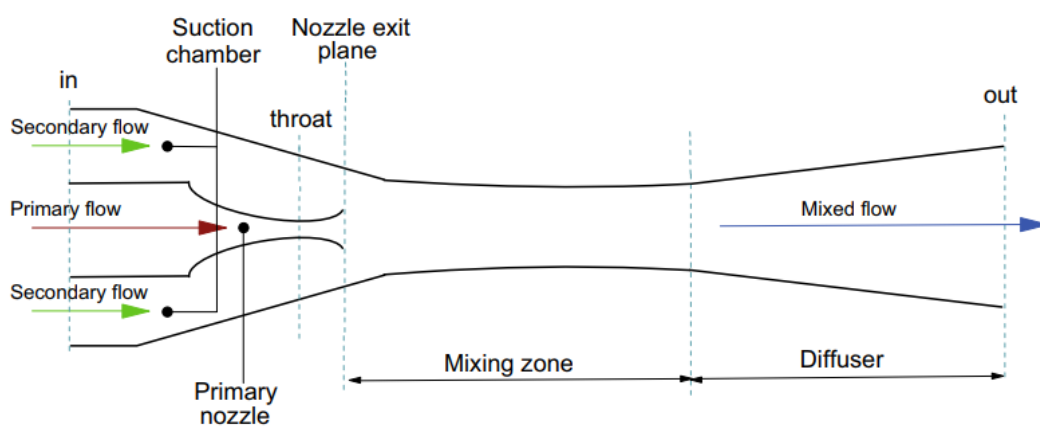


Fig. 4.3: Esquema interno de un eyector. [Besagni 2015]

Así pues, un eyector consta de 4 zonas:

- **Tobera:** Es el dispositivo por donde entra el flujo primario, y se encarga de acelerarlo y reducir así su presión. Como hemos visto en el apartado anterior, las hay de dos tipos: las convergentes y las convergente-divergentes. Estas últimas, por el hecho de no estar limitadas a la velocidad del sonido, siempre serán capaces de lograr presiones inferiores y temperaturas más bajas.

En adelante nos centraremos en los eyectores con tobera convergente, pues es éste el tipo de eyector del que disponemos para hacer las pruebas experimentales.

- **Cámara de succión:** Es la cavidad situada alrededor de la tobera, y en ella tenemos las bajas presiones generadas por la descarga del flujo primario a alta velocidad a través de la tobera, que succionan el fluido secundario.
- **Zona de mezcla:** Empieza un poco después de la salida de la tobera, donde ambos flujos entran en contacto y se empiezan a mezclar. En esta región el flujo primario cede parte de su energía en forma de velocidad al flujo secundario, de tal forma que lo acelera.
- **Difusor:** Una vez que ambos flujos ya se han mezclado completamente, el flujo resultante se dirige hacia el difusor, donde se reduce su velocidad y se aumenta su presión, antes de avanzar hacia el conducto de salida.

4.3 Uso en las pilas de combustible

Como hemos comentado en el tema 2, las pilas de combustible reales requieren de una proporción hidrógeno-oxígeno más rica en hidrógeno que la proporción estequiométrica, por lo que se termina obteniendo un excedente de hidrógeno.

Dicho excedente, en caso de ser liberado a la atmósfera, supondría una pérdida energética importante, además de un gran impacto medioambiental ^[8], y un peligro potencial debido a su inflamabilidad. Por ello conviene recircular el exceso de hidrógeno de nuevo hacia la entrada, y aquí es donde entra en juego el eyector.

Para recircular el hidrógeno excedente se pueden usar compresores, pero éstos suponen una solución con varias dificultades: el material del que se construyen debe ser resistente a la corrosión producida por la humedad que contiene el hidrógeno ^[5]; los lubricantes que pueda requerir el sistema no pueden entrar en contacto con el hidrógeno en ningún caso; y suponen un nuevo sub-sistema con un consumo extra de energía, que requiere de mantenimiento.

Por esa razón los eyectores suelen ser una mejor opción, ya que no tienen partes móviles, no requieren de mantenimiento, y se alimentan de la misma presión que suministra el caudal primario. Sin embargo tienen una importante desventaja: su eficiencia se puede ver reducida en gran manera cuando trabajan fuera de las condiciones de diseño ^[9].

Teniendo el eyector conectado a la pila, de tal forma que la salida del eyector es la entrada de la pila, y con el caudal no consumido recirculando por el secundario del eyector, podríamos establecer la estequiometría según los caudales del eyector, recuperando la ecuación 2.1:

$$\text{Estequiometría} = \frac{\dot{m}_{H_2 \text{ suministrado}}}{\dot{m}_{H_2 \text{ consumido}}} = \frac{\dot{m}_{\text{salida}}}{\dot{m}_1} \quad \text{ec. 4.1}$$

4.4 Propiedades de los eyectores

En este apartado vamos a exponer las propiedades y comportamientos que actualmente se sabe que presentan los eyectores, y que se han ido recogiendo en la literatura científica.

4.4.1 Modos de funcionamiento

Los eyectores presentan distintos comportamientos, según las condiciones de presión dadas a la entrada del flujo primario, a la entrada del flujo secundario, y a la salida. Para analizar la respuesta y así evaluar la eficiencia del eyector, el parámetro usado suele ser el ratio de succión (ω), que se calcula como ^[10]:

$$\omega = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \quad \text{ec. 4.2}$$

El comportamiento de los eyectores se puede clasificar en 3 fases o modos distintos de funcionamiento:

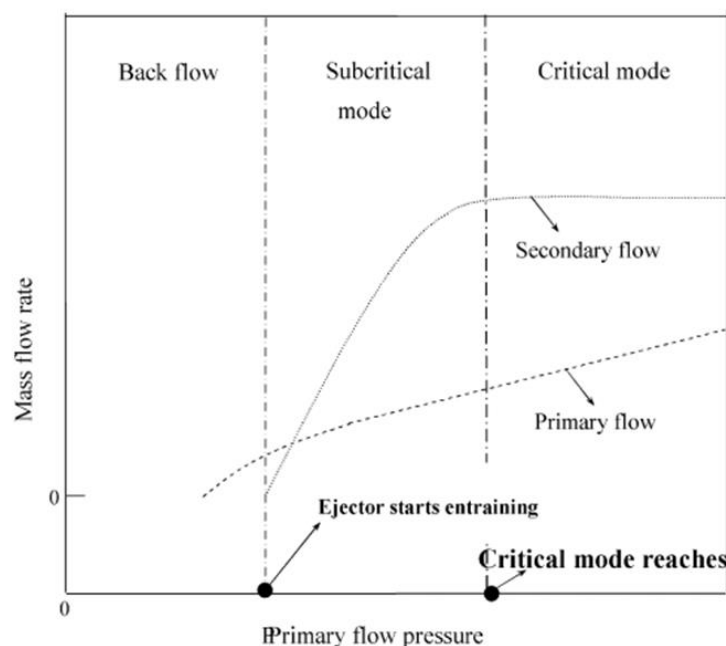


Fig. 4.4: Visualización de los modos de funcionamiento de un eyector con tobera convergente. En el eje y visualizamos los caudales primario y secundario. En el eje x representamos una presión primaria "genérica", manteniendo la presión de secundario y de salida constantes. [Zhu 2009]

- **Modo de retorno (mal funcionamiento):** Ocurre cuando la presión en el primario es relativamente baja (o cuando la presión a la salida es elevada), de tal manera que no se logra inducir la corriente del fluido secundario. La cámara de succión se llena del fluido primario, pudiéndose producir una inversión del flujo en el conducto secundario, que ahora actuará como salida. Por lo tanto en este caso el ratio de succión (ω) será nulo o negativo. En este modo el eyector es totalmente inútil, y por lo tanto se intentará evitar siempre trabajar en esta fase.

- **Modo sub-crítico:** Si aumentamos la presión en el primario (o reducimos la presión a la salida) entraremos en el modo sub-crítico, donde el eyector empieza a funcionar como es debido, induciendo la corriente del flujo secundario. En esta fase se establece una relación directamente proporcional entre la presión del flujo primario y los caudales primario y secundario. Esto la convierte en una muy buena zona de trabajo, pues nos permite regular ambos caudales mediante la presión de entrada. Durante la mayor parte de esta fase el caudal primario suele estar bloqueado, por lo que no depende de la presión de salida.
- **Modo crítico (o de doble bloqueo):** Se da cuando tenemos una alta presión en la entrada del flujo primario. Esta elevada presión de entrada provoca que el caudal primario adquiera valores bastante elevados, por lo que las presiones a la salida del eyector bajan muchísimo, tanto que bloquean el caudal secundario. Es por ello que a éste modo también se conoce como “de doble bloqueo”. Este efecto se debe a que la presión en la salida de la tobera actúa esencialmente como presión de descarga del flujo secundario, el cual acaba experimentando un derrame estacionario a su paso por el eyector, y por lo tanto, a presiones de descarga muy bajas, sufre un bloqueo sónico. Si continuamos subiendo la presión en el primario observaremos como el caudal primario sigue aumentando, pues no estamos modificando su presión de descarga; por lo contrario el flujo secundario se encontrará con una presión de descarga cada vez más baja, y no será capaz de aumentar su caudal a menos que subamos la presión de entrada del secundario.

4.4.2 Fases del fluido

Una de las dificultades que presentan los eyectores es que la aceleración de los fluidos que se produce, además de reducir su presión también reduce su temperatura. Las bajas temperaturas combinadas con el contenido en vapor de agua que puedan tener los fluidos de estudio (ver punto 2.4.2), puede producir la condensación de ese vapor.

Esto nos obliga en ocasiones a tener que considerar fluidos con dos fases (gas y líquido) dentro del eyector, lo cual complica el modelo matemático-físico y las simulaciones.

Esta es la principal razón por la que muchos eyectores destinados a funcionar con pilas de hidrógeno (incluido el nuestro) tienen tobera convergente, para reducir la probabilidad de condensación debida a las bajas temperaturas.

Dado que no vamos a simular ni experimentar con contenido de vapor en el hidrógeno, esto no será un problema para nosotros, pero puede ser el origen de la discrepancia entre los resultados encontrados en este trabajo, y los resultados que puedan obtenerse si se considera este efecto, influyente tanto en las simulaciones como en el laboratorio.

4.5 Simulación de eyectores en CFD

En este apartado hablaremos sobre los parámetros a tener en cuenta en la simulación en CFD de un eyector, y de todo lo que se ha investigado y se conoce sobre el tema.

4.5.1 Número de dimensiones

A la hora de simular el comportamiento de los eyectores en un programa de CFD, una de las características más importantes de un modelo son las dimensiones con las que trabaja.

Los modelos más sencillos son los de 0 dimensiones, que funcionan asignando un valor de eficiencia a cada una de las partes del eyector (tobera, cámara de succión, zona de mezcla y difusor), y relacionándolos entre sí mediante ecuaciones de conservación ^[11]. El principal problema reside en dotar a los distintos componentes de los valores de eficiencia correctos, pues dichos valores varían mucho según la geometría del eyector y sus condiciones de funcionamiento ^[11]. Además estos modelos no son capaces de predecir las características locales del flujo, ni de predecir las longitudes y ángulos más importantes que afectan al comportamiento del eyector.

Los modelos 1D son capaces de considerar las diferentes geometrías del eyector ^[11], dado que conocen el área de paso para cada coordenada de su único eje (paralelo a la dirección del flujo). Además son capaces de registrar la mezcla entre los dos flujos y las ondas de choque generadas en la zona de mezcla y el difusor, y pueden llegar a predecir el caudal másico con desviaciones cercanas al 5% ^[11].

Los modelos 2D axisimétricos simulan el flujo en un plano asimilando que existe un eje de simetría en el experimento alrededor del cual todas las condiciones son iguales: la geometría es la misma, las condiciones no varían y el flujo se comporta de igual manera (Fig. 4.5). La principal desventaja de estos modelos es que en la realidad la mayoría de los eyectores, por razones constructivas, tienen a entrada secundaria lateral (y no axial), lo cual induce ciertos efectos asimétricos no despreciables en el flujo, los cuales no se pueden tener en cuenta en un modelo axisimétrico ^[12]. Por otro lado su principal ventaja es que, en comparación con los modelos 3D, requieren de pocos recursos para ser simulados, y por lo tanto los tiempos de cómputo se ven reducidos.

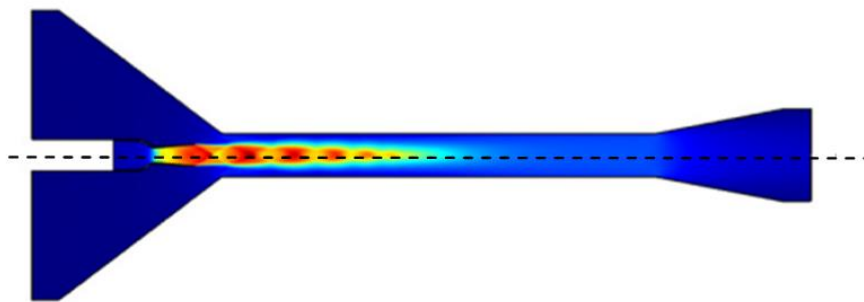


Fig. 4.5: Eyector simulado con geometría 2D axisimétrica. [COMSOL Multiphysics 2017]

Por ultimo están los modelos 3D, que simulan sobre toda la geometría “real” sin simplificar geométricamente el problema ni asumir ninguna simetría. Por lo tanto, estos son a priori los modelos que más se acercan a la realidad experimental, pues por ejemplo, son capaces de predecir asimetrías en el flujo (lo cual muestra que los modelos axisimetricos se equivocan en estos casos) ^[12]. Sin embargo, bien es cierto que el hecho de tener que simular toda la geometría tridimensional implica un coste computacional mayor. Estos modelos generalmente pueden ser capaces de predecir los caudales experimentales con desviaciones raramente superiores al 20% ^[11,12].

4.5.2 Modelo de turbulencia

Por otra parte también es relevante el modelo de turbulencia que se usa en la simulación, pues cada modelo trabaja de forma diferente y puede dar resultados algo distintos. El tipo de modelos más usados en este y en la mayoría de los campos son los RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), caracterizados por resolver las ecuaciones de Navier-Stokes usando valores promedio de las variables fluctuantes. No obstante se distinguen entre ellos por el hecho de aplicar aproximaciones distintas en ciertas zonas de estudio, o directamente resolver las ecuaciones sin aproximación.

Los estudios recientes se han centrado sobre todo en los modelos $k-\epsilon$ y $k-\omega$, además de Spalart-Allmaras y variantes de los dos primeros ($k-\epsilon$ Realizable, $k-\omega$ -SST, etc.). Del estudio ^[9] se llega a la conclusión que en general el modelo Spalart-Allmaras es el que ha dado los mínimos errores con los mínimos recursos, aunque también apreciamos en dicho estudio que tanto los errores relativos, como los recursos consumidos por los distintos modelos, no suelen variar más de un 10%. Por otro lado en el estudio ^[7] se comparan el $k-\epsilon$ y $k-\omega$ -SST, llegando a la conclusión de que el primero es ligeramente mejor simulando las condiciones de diseño del eyector y el segundo hace aproximaciones algo mejores cuando queremos trabajar alejados del punto crítico.

En resumen, podemos concluir que las diferencias entre estos modelos de turbulencia no son abismales, ni existe un modelo que destaque por encima del resto como el mejor, por lo que el modelo que escojamos no debería condicionar en gran medida la bondad de los resultados obtenidos.

4.5.3 Mallado

Por último también hay que tener en cuenta la malla que usamos, ya que es un elemento esencial que determina tanto los costes de cálculo como la precisión de los resultados.

El parámetro más usado para comparar las mallas entre sí suele ser el número de elementos que la componen, al cual nos solemos referir como “tamaño” de la malla. Así pues una malla muy gruesa, es una malla que cubre la zona de estudio con pocos elementos muy grandes; y por el contrario, una malla fina es aquella que usa muchos elementos muy pequeños para discretizar el objeto de estudio.

Las mallas demasiado gruesas no son capaces de captar con suficiente detalle los cambios en las variables de interés, por lo que no proveen de soluciones suficientemente precisas, pudiendo llegar al caso de que el programa no logre llegar a un resultado estable, y la simulación falle. En el otro extremo una malla muy fina, requerirá de muchos recursos computacionales para ser resuelta, y en la mayoría de casos el programa no logrará alcanzar la convergencia, especialmente si no ha sido provisto de una buena solución inicial.

En la mayoría de aplicaciones donde se pretende simular un flujo relativamente complejo se suele empezar por ejecutar las primeras simulaciones con mallas relativamente gruesas, y se van refinando a medida que se tienen más resultados. Esto ayuda a que las primeras simulaciones puedan converger dándonos una aproximación suficientemente buena a los resultados con la que lanzar una nueva simulación con una malla algo más fina. De esta forma iremos obteniendo cada vez soluciones más exactas.

Estas soluciones “primarias” que obtenemos, no sólo nos sirven como base para la siguiente simulación, sino que también nos permiten visualizar en qué zonas se están produciendo los mayores cambios en el flujo, y por ende en qué zonas debemos refinar la malla (ver figura 4.6) para extraer más información ^[13].

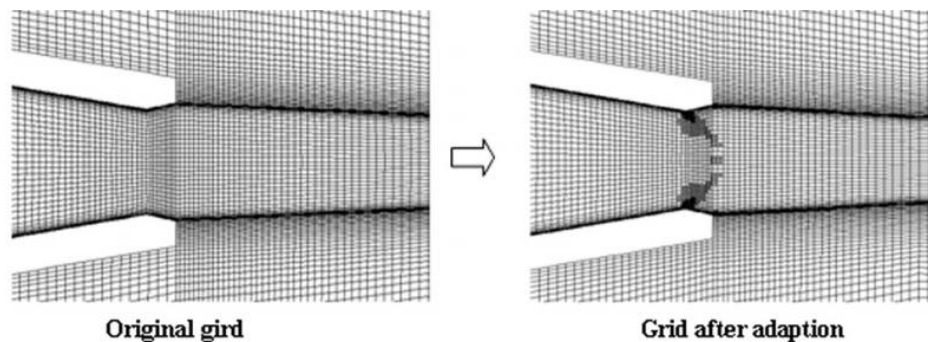


Fig. 4.6: Refinado de la malla en las zonas de interés. [Li 2010]

Los estudios previos de eyectores simulados con geometría 2D axisimétrica han usado mallas de entre 50.000 y 100.000 elementos como mallas de “tamaño medio”, llegando hasta 250.000 elementos en mallas “finas” ^[9, 13]. Por otra parte los modelos 3D usan siempre más elementos, desde 150.000 hasta 350.000 para un tamaño “normal” de malla ^[12]. Lógicamente el número de elementos depende mucho del tamaño de eyector que se quiere simular, así como del tipo de simulación que se quiera realizar, por lo que estos datos nos dan sólo una idea del orden de magnitud que podría tener el tamaño de la malla.

4.5.4 Condiciones de contorno

En muchas ocasiones, las diferencias entre los resultados experimentales y los resultados de las simulaciones se deben a que las condiciones de contorno experimentales y simuladas no son exactamente las mismas, y no se están tomando exactamente las mismas medidas en los mismos puntos ^[7].

Es por este motivo que debemos vigilar al comparar directamente nuestros resultados experimentales con los obtenidos en la simulación, pues antes debemos ser conscientes de cómo funcionan nuestros aparatos de medida y qué calculan las simulaciones, así como qué condiciones estamos estableciendo en el modelo y qué condiciones conseguimos en el laboratorio, para confirmar que los resultados puedan ser contrastados.

5. EQUIPO EXPERIMENTAL

5.1 Layout experimental

En este tema vamos a empezar describiendo el montaje experimental del que nos hemos servido para llevar a cabo los experimentos de laboratorio. Como es lógico toda la distribución va enfocada a abastecer el eyector con sus caudales primario y secundario y a controlar la salida del gas, en resumen, podríamos decir que todo el montaje gira alrededor del eyector. Por ello, empezaremos viendo que aspecto tiene dicho dispositivo.

5.1.1 Eyector

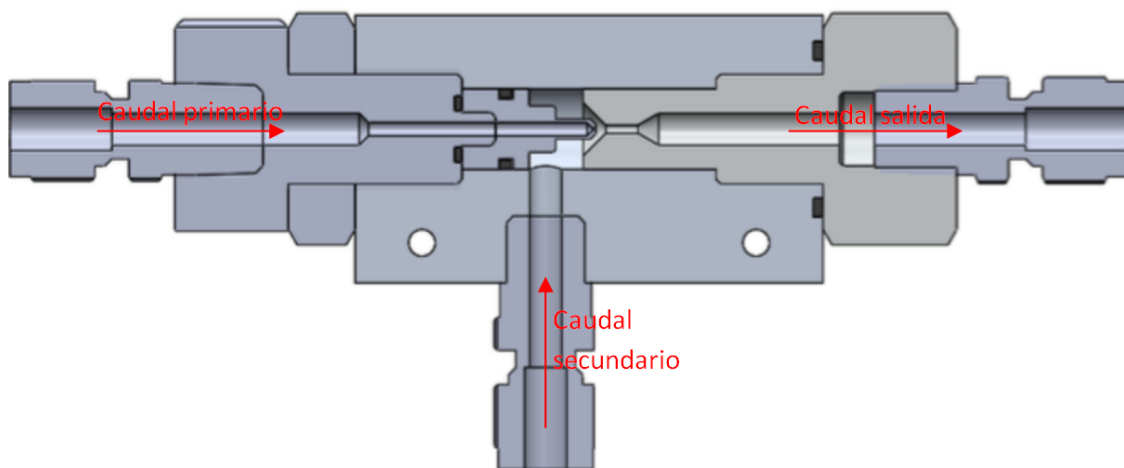


Fig. 5.1: Vista en sección del diseño del eyector. En rojo se han señalado los caudales. [Corbella 2015]

En la figura 5.1 podemos ver la forma del eyector en una sección paralela al flujo. A la izquierda tenemos la entrada primaria, a la derecha la salida y el caudal secundario entra radialmente por la parte inferior. Éste último es un detalle muy relevante, en primer lugar porque determinará el montaje de las líneas de alimentación, pero sobretodo porque una entrada radial inducirá un flujo no axisimétrico en el eyector. Tal y como vimos en el apartado 4.5.1, esto nos obliga a utilizar un modelo tridimensional en nuestras simulaciones.

Si nos fijamos más de cerca podemos apreciar la geometría interna del eyector en sí. Ésta es la parte que hará que el eyector trabaje como tal, induciendo el flujo secundario. Aquí están los parámetros geométricos que realmente afectan al comportamiento del sistema (ver figura 5.2).

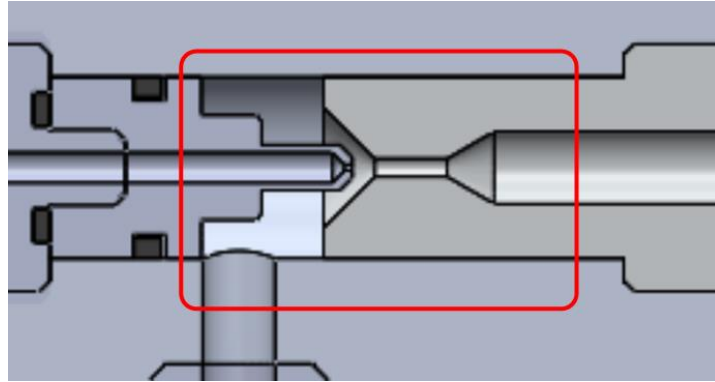


Fig. 5.2: Zoom de la geometría interna del eyector. [Corbella 2015]

5.1.2 Sistema de alimentación y recogida de datos

Ahora que sabemos cómo está construido internamente el eyector, vamos a ver el montaje de todo el sistema.

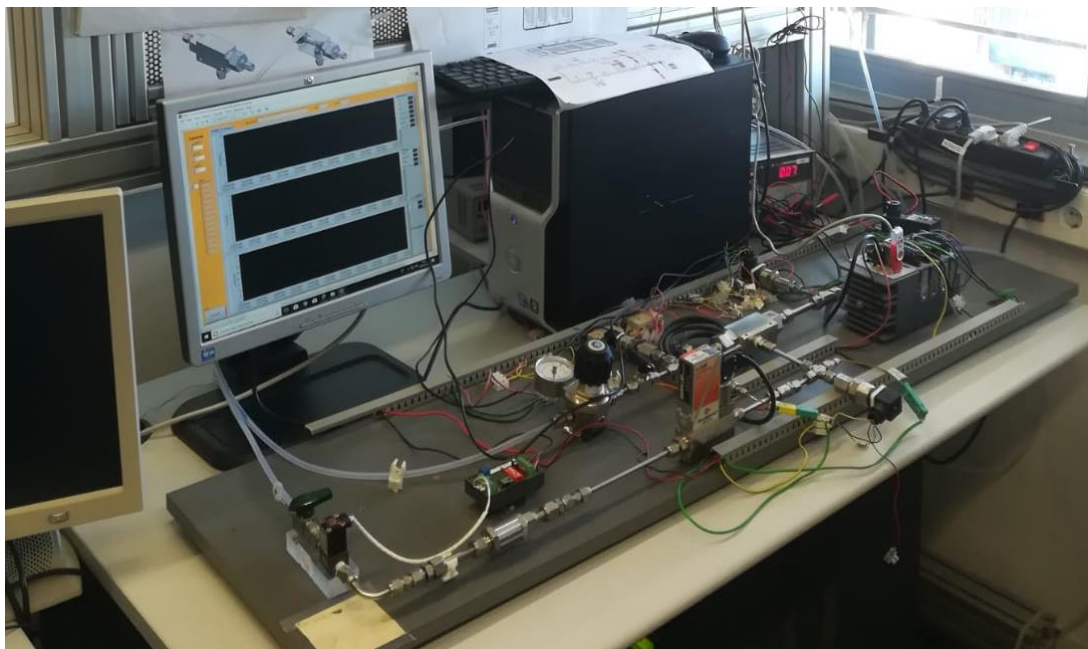


Fig. 5.3: Montaje experimental: vista general.

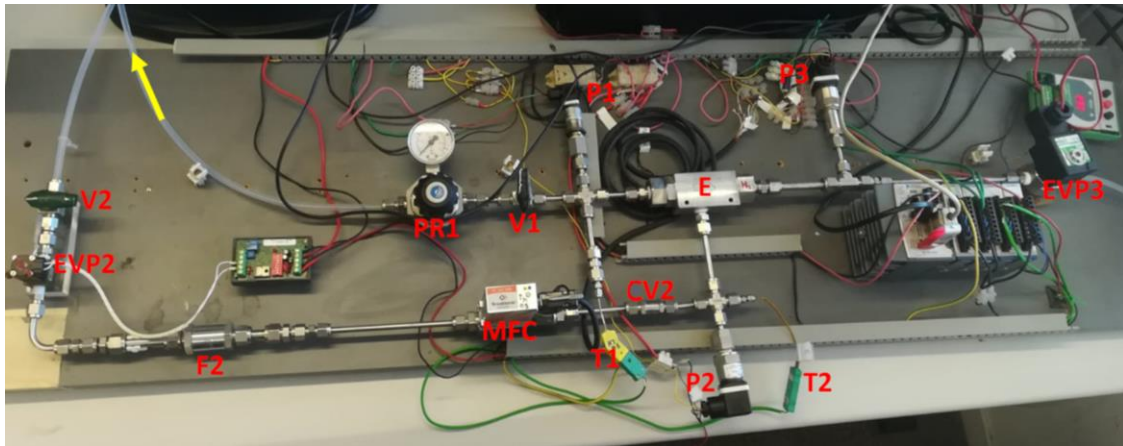


Fig. 5.4: Montaje experimental: en rojo está marcado el nombre de cada dispositivo; en amarillo, una flecha que señala aguas arriba del caudal 1, dónde se encuentran ubicados todos los dispositivos que no aparecen en la imagen pero sí en el esquema.

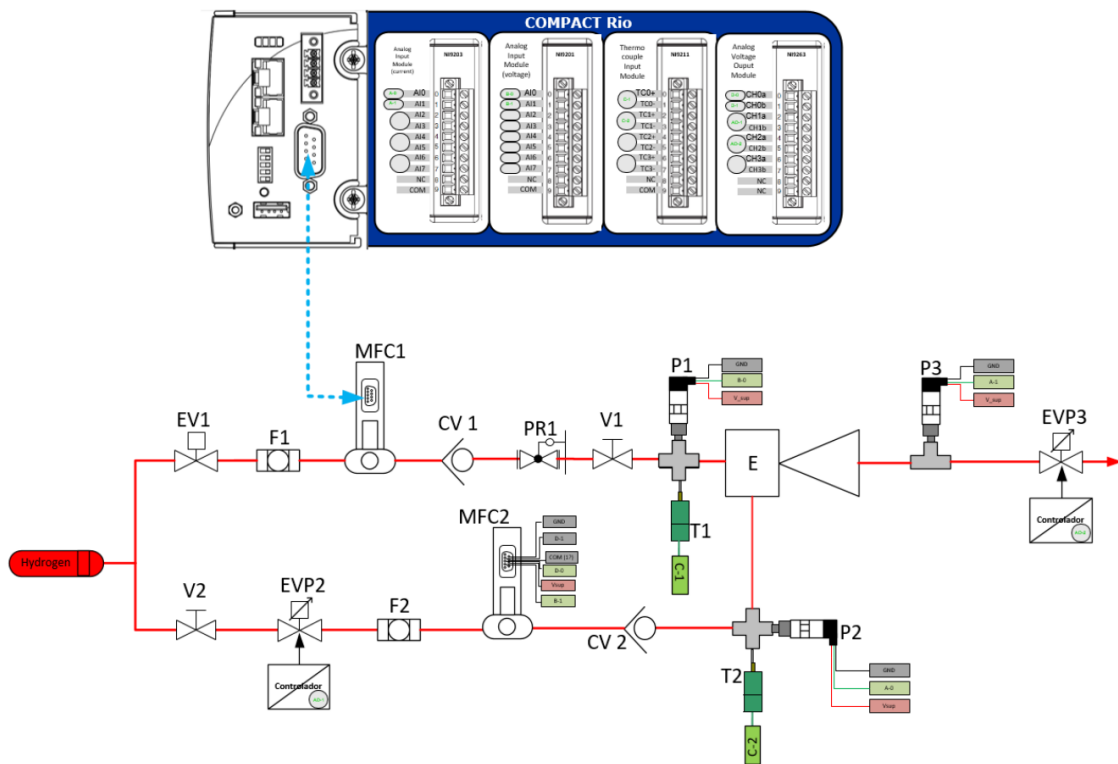


Fig. 5.5: Esquema del montaje experimental. Los nombres de cada dispositivo se vinculan con los de la fig. 5.4

A continuación una lista con los diferentes dispositivos y una breve descripción de cada uno:

- **V1, V2:** Válvulas manuales de los caudales de entrada (1 y 2 respectivamente). No sirven para regular el caudal sino para abrir o cerrar completamente la línea.
- **EVP2, EVP3:** Electroválvulas de la línea secundaria y de salida, respectivamente. Estas sí se utilizan para regular el caudal de forma electrónica.
- **PR1:** Válvula manual de regulación del caudal primario. Tiene un barómetro acoplado.
- **CV1, CV2:** Válvulas anti-retorno de los flujos primario y secundario, respectivamente.

- **P1, P2, P3:** Sensores de presión en la línea primaria, secundaria, y de salida, respectivamente.
- **T1, T2:** Sensores de temperatura en las entradas primaria y secundaria, respectivamente.
- **MFC1, MFC2:** Caudalímetros de flujo másico a través de la entrada primaria y secundaria, respectivamente.
- **F1, F2:** Filtros de partículas de los caudales primario y secundario, respectivamente. Están colocados antes de los caudalímetros, para protegerlos.

Algunos dispositivos de la línea primaria (CV1, MFC1, F1, EV1) no aparecen en la fotografía (figura 5.4) pero sí en el esquema (figura 5.5). Esto se debe a que están ubicados aguas arriba, por dónde muestra la flecha amarilla, y no ha sido posible fotografiarlos.

En el anexo A se dispone una tabla con las especificaciones más detalladas de cada uno de los componentes.

5.2 Funcionamiento del sistema

Ahora que hemos mostrado la disposición de nuestro sistema, vamos a ver cómo funcionan los distintos dispositivos a la hora de realizar un experimento y recoger los datos.

Por lo que se refiere a la recogida de datos, es un proceso que se lleva a cabo de forma totalmente informatizada. Todos los sensores (de presión, caudal y temperatura) están conectados al controlador (ver figura 5.5), que a su vez está conectado a un ordenador (ver figura 5.3).

Además también se registran los valores de tensión enviados a las electroválvulas, de forma que podemos saber si están totalmente cerradas (tensión = 0V), medio-abiertas (tensión entre 0V y 10V), o completamente abiertas (tensión = 10V).

Desde el ordenador se gestiona toda la información mediante un programa de LabVIEW. La aplicación nos muestra de forma gráfica el valor de todas las variables medidas a tiempo real, a la vez que las recoge en un fichero de texto. Al finalizar el experimento, cesa la recogida de datos y el programa guarda el archivo de texto con todos los datos.

En lo referente al control del sistema, las electroválvulas situadas en la línea secundaria y de salida se regulan mediante la orden del controlador, en función del valor de presión actual, y del valor de consigna que le hayamos otorgado. Dichas consignas de presión se establecen a través del programa de LabVIEW, desde dónde también podemos modificar las constantes de los PID que controlan la acción de las electroválvulas.

Por otra parte en la línea primaria no disponemos de ninguna electroválvula, en su lugar regulamos la presión manualmente mediante la válvula PR1.

5.3 Procedimiento experimental

Ahora que tenemos una idea de cómo está montado el sistema y de cómo funciona, vamos a ver cómo se ha procedido a la hora de realizar cualquiera de los ensayos experimentales.

Lo primero que se hace es abrir la válvula de alimentación principal del hidrógeno, la cual nos suministra los caudales primario y secundario (ésta válvula no aparece en los diagramas ya que no forma parte del montaje en sí). Entonces se abren por completo todas las válvulas excepto la válvula de la salida (EVP3). Para abrir o cerrar las electroválvulas, damos valores de consigna extremos a la presión, y comprobamos que su tensión vale 0V o 10V.

Ahora que hemos logrado cerrar la válvula de salida, todo el sistema estará bajo presión, y nos encontraremos en disposición de buscar posibles fugas. Para ello cerraremos la válvula de alimentación principal, y esperaremos un par de minutos controlando las lecturas de presión. Si vemos que las presiones están disminuyendo, ello nos indica que existen fugas en el sistema.

En tal caso, procedemos a aplicar agua con jabón mediante un cepillo en todas las juntas y uniones hasta encontrar el causante de la fuga (lo sabremos porque el agua burbujea alrededor de esa zona). Apretaremos y/o revisaremos el estado de éstas uniones, hasta lograr la estanqueidad de todo el sistema.

Una vez sabemos que el sistema no tiene fugas, y todavía con todos los conductos presurizados y con la válvula de salida cerrada, es buen momento para comparar los valores de presión que están registrando los distintos sensores, pues al estar la válvula de salida cerrada, no debería circular caudal y por lo tanto todas las presiones deberían ser iguales. Además los valores de caudal registrados deberían ser nulos. Si alguna de las presiones se desvía considerablemente, o alguno de los caudalímetros registra un caudal no despreciable, lo más seguro es que haya que calibrar el aparato de medida.

Las válvulas manuales V1 y V2 no sólo se usan para hacer las comprobaciones iniciales, sino que su principal propósito es poder anular una de las dos entradas para poder estudiar el comportamiento de cada entrada por separado, como veremos en el tema 7.

Por último, cuando estamos realizando un experimento, siempre esperaremos a que el sistema alcance una situación estacionaria, ya que no es objeto de este trabajo estudiar los transitorios del eyector. Para ello debemos esperar a que los valores de presión alcancen el valor de consigna (en caso de estar controlados de forma electrónica), y debemos verificar que todas las lecturas se mantienen estables, tanto las de presión, como las de caudal y voltaje.

5.4 Post-procesado

Una vez finalizado el experimento, nos encontramos con una gran cantidad de información que debemos procesar, y de la cual sólo nos interesa una pequeña parte. Esto va relacionado con el hecho de que sólo queremos estudiar ciertos puntos estacionarios, y sin embargo el programa está constantemente registrando datos, de tal manera que cuando pasamos de un punto de estudio al siguiente, todo el régimen transitorio que se produce entremedio queda también registrado en el archivo de datos.

Lo primero que hacemos es pasar la información a una hoja de cálculo de Excel. Una vez ahí, empezamos por crear una columna dónde se calcula el promedio de los 10 valores anteriores de las variables de interés, en este caso las presiones y los caudales. Esto nos ayuda a mitigar las fluctuaciones típicas de cualquier aparato de medición que mida con bastantes decimales, y en intervalos de tiempo relativamente pequeños.

Si en el experimento variamos las presiones mediante consigna, en la hoja de datos podemos fijarnos en esos valores de consigna y ver en qué momento cambian. Cuando tenemos un cambio en el valor de consigna, significa que a la hora de hacer la experimentación se consideró en ese punto que ya habíamos alcanzado la condición estacionaria. Es por lo tanto justo antes de ese cambio de consigna donde estarán los valores estacionarios que queremos.

Cuando por lo contrario las presiones se han ido variando mediante la válvula manual, nuestra única forma de encontrar el punto estacionario es ir mirando las lecturas de presión hasta que vemos que se alcanzan los valores que previamente hemos decidido evaluar en la fase de experimentación.

Para escoger los valores estacionarios de un punto, siempre nos fijamos en que los 20 o 30 valores previos recogidos de todas las propiedades medidas (presiones, caudales, temperaturas, y voltajes) no diverjan de manera importante. Una vez detectados los valores de interés, se destacan manualmente y a posteriori se recogen todos en una misma tabla que ya contiene únicamente los puntos estacionarios.

Sin embargo, antes de poder contrastar los resultados con los de las simulaciones, es necesario hacer un cambio de unidades en el caudal, ya que COMSOL nos devuelve el resultado en Kg/s y los caudalímetros del laboratorio leen en l_n/min. Pasa algo similar con las presiones, ya que COMSOL trabaja en presiones absolutas, y en cambio todos los barómetros experimentales suelen medir presiones relativas, de forma que se debe sumar la presión atmosférica.

6. MODELO DE CFD

6.1 Introducción

6.1.1 Software

Para llevar a cabo las simulaciones computacionales del eyector hemos escogido el programa COMSOL Multiphysics, en su versión 5.3a. Se trata un software de modelado y simulación con muchos módulos, cada uno de los cuales está orientado a modelizar campos distintos de la física, como por ejemplo la mecánica estructural, la transferencia de calor, la mecánica de fluidos, la electricidad o la acústica, entre otros. En nuestro caso solo vamos a hacer uso del módulo de mecánica de fluidos, probablemente uno de los más utilizados.

6.1.2 Modelo previo

Antes de seguir con el siguiente punto, es importante mencionar que como ya se ha dicho en la introducción, el modelo que se ha usado para realizar las simulaciones del presente estudio no ha sido creado desde cero para la ocasión. Por el contrario se ha optado por aprovechar el modelo de un trabajo de final de grado que previamente ya se había llevado a cabo en el mismo departamento de Mecánica de Fluidos de la EEBE, y que realizó un estudio acerca del mismo eyector que se ha utilizado en este trabajo.

La principal ventaja de hacer esto, es que pudimos partir de un modelo ya funcional, que tenía la misma geometría interna que el eyector real del laboratorio. Además, disponíamos de varias simulaciones con resultados que podríamos usar como resultado previo de nuestras simulaciones, lo cual, como ya hemos comentado en el apartado 4.5, ayuda a reducir en gran medida los tiempos de cómputo, y facilita la convergencia al modelo matemático.

Aprovechar el modelo nos ha permitido ahorrarnos un tiempo que hemos invertido en perfeccionar dicho modelo y en corregir algunos defectos que presentaba, y en llevar a cabo más experimentos que no hubiesen sido posibles de no hacerlo así.

6.2 Configuración

En este apartado vamos a hablar de las características y particularidades más relevantes de nuestro modelo, tanto los aspectos que hemos modificado como los que no.

6.2.1 Geometría

Tal como hemos visto en apartados anteriores, nuestro eyector tiene una entrada radial, lo cual nos obliga a utilizar una geometría en 3D en nuestro modelo computacional.

Como ya hemos comentado, en este apartado partíamos de una base ya construida. La geometría del modelo pretende replicar únicamente los conductos internos del eyector (como vimos en el tema anterior, esta es la parte de la geometría que determina el comportamiento del eyector), y tiene un aspecto como éste:

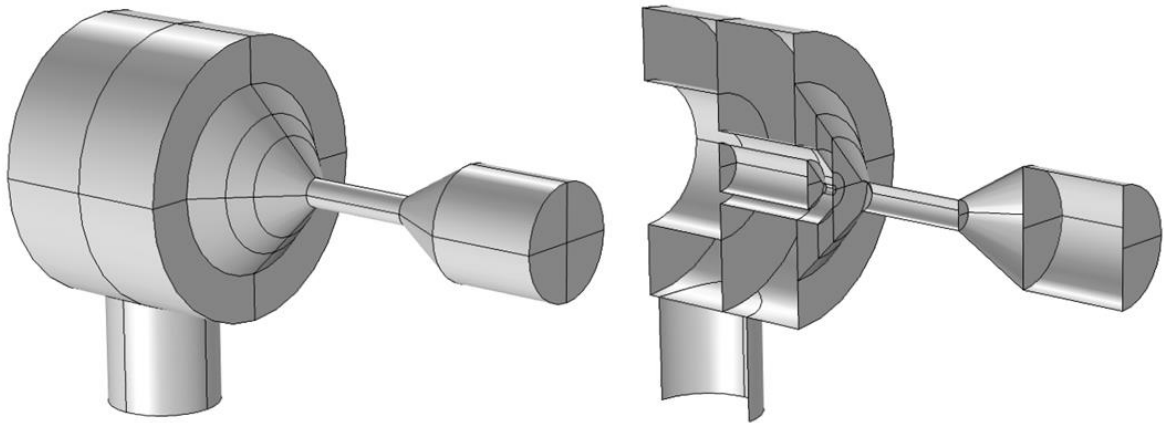


Fig. 6.1: Geometría del eyector del modelo. Aspecto exterior en la izquierda y vista de sección a la derecha.

A continuación hemos realizado un pequeño esquema de nuestro eyector que ayuda a distinguir sus partes y a ilustrar su funcionamiento:

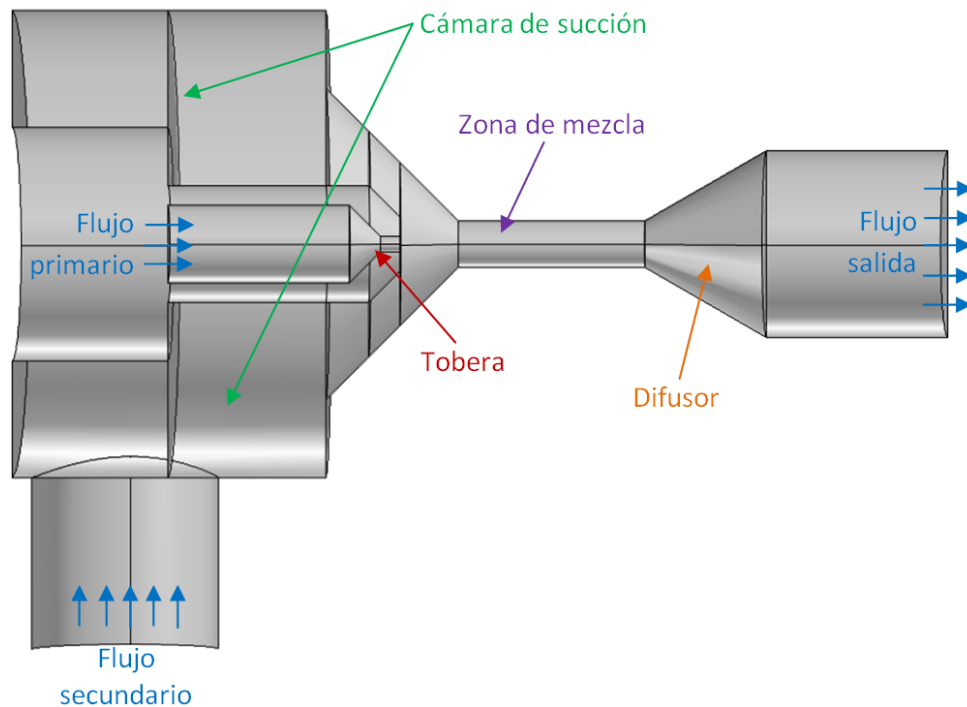


Fig. 6.2: Vista lateral seccionada del eyector, con algunos apuntes esquemáticos.

Antes de empezar a hacer simulaciones, comparamos la geometría del modelo con los planos de fabricación del eyector, y verificamos que todos los parámetros dimensionales correspondientes coincidían.

El modelo en sí está construido en dos partes: la parte superior, hecha mediante una operación de revolución, ya que es axisimétrica; y la parte inferior, que consiste simplemente en el cilindro por donde entra el caudal secundario a la cámara de succión.

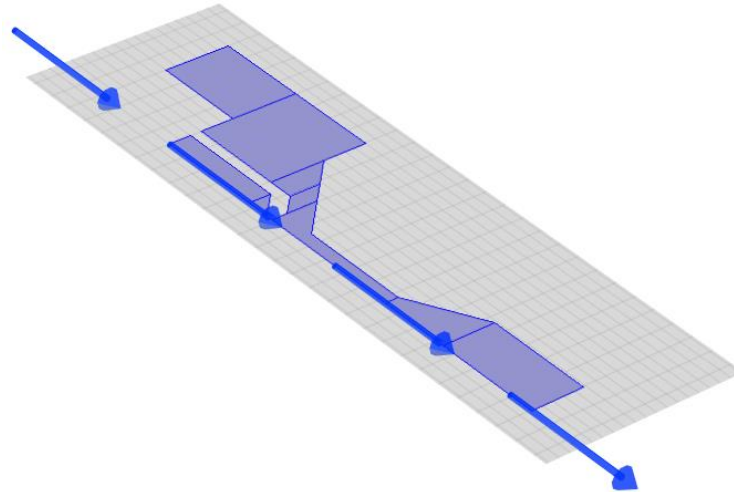


Fig. 6.3: Plano de revolución. Las flechas representan el eje de revolución.

Pues bien, uno de los problemas que encontramos con el modelo es que tenía por defecto seleccionada una opción en la operación de revolución que mantenía las caras del plano de axisimetría una vez hecha la revolución.

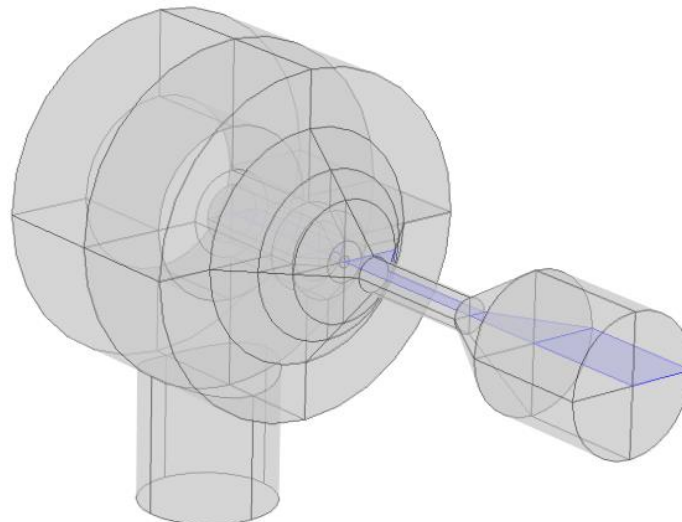


Fig. 6.4: Vista con transparencia del eyector. En azul están destacadas las superficies "restantes" del plano de revolución.

Esto no afecta al comportamiento del fluido ya que esos planos no actúan como paredes, pero si alteraba la construcción de la malla, y por lo tanto podría haber comprometido la bondad de los resultados.

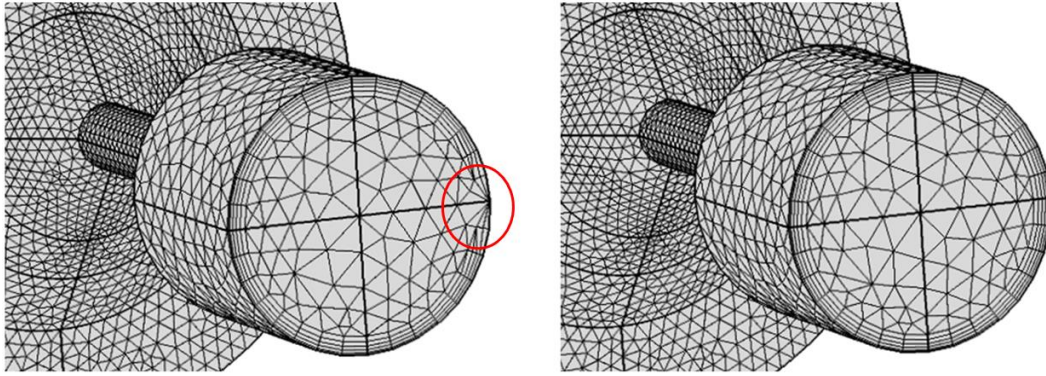


Fig. 6.5: Eyector, cara de salida. En la izquierda vemos la anomalía causada en la malla al mantener los planos de simetría, a la derecha la misma malla con el problema corregido.

6.2.2 Modulo de mecánica de fluidos

Dado que el nuestro es un estudio de mecánica de fluidos, el modulo escogido es el de flujo de fluidos (fluid flow). Más en concreto, dentro de ese modulo escogemos la opción de flujo con alto número de mach (high mach number flow), con la opción de flujo turbulento y con el modelo de turbulencia k- ϵ .

En conclusión, tenemos un módulo preparado para resolver flujos compresibles turbulentos, tal como se prevé que va a ser el flujo real en el dispositivo, y que además va a usar un modelo de turbulencia (el k- ϵ) ampliamente testado en aplicaciones muy similares y que ha demostrado dar buenos resultados con recursos de computación razonables, según vimos en el apartado 4.5.2.

Ya escogido el modelo físico, hay que determinar las condiciones de contorno, en este caso qué superficies actúan como entradas y salidas, y qué superficies actúan como paredes y aislamiento térmico, así como las condiciones del flujo en cada una de esas superficies. De esta forma estamos vinculando la geometría al modelo físico.

Para las entradas y salidas seleccionamos las caras correspondientes, y para nuestro propósito hemos decidido que la condición definida sea la presión, haciendo entonces que el programa calcule el caudal que se establece con esas presiones, pues esencialmente esto es lo mismo que se ha hecho en los experimentos del laboratorio, fijando las presiones y midiendo los caudales.

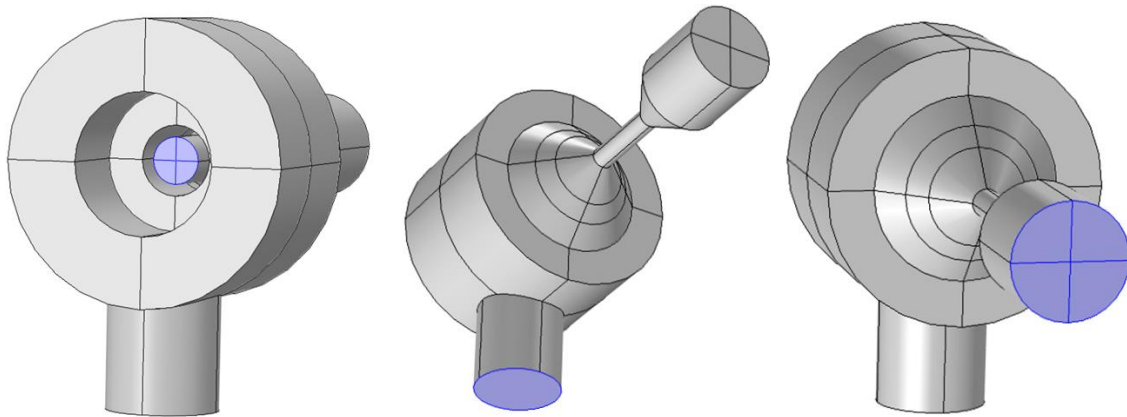


Fig. 6.6: De derecha a izquierda: entrada primaria, entrada secundaria, y salida (superficies destacadas en azul).

Por último también deben determinarse en este punto las propiedades del fluido de estudio, en nuestro caso el hidrógeno. En este punto podemos escoger de qué forma determinará el programa los valores que adquieren las propiedades del fluido.

Para la conductividad y la viscosidad, el programa nos da dos opciones: calcularlas según dicta la información que tiene la librería de COMSOL acerca de ese material, o calcularlas en función de la temperatura conforme a la ley de Sutherland. Dicha ley también depende de una constante propia del material (constante de Sutherland).

Por otra parte, las constantes del gas (constante específica del gas y relación de calores específicos), también pueden cogerse de la información del material en la librería o se pueden definir manualmente.

Después de unas primeras tandas de simulaciones en las que se encontró que los resultados divergían notablemente de los obtenidos en el laboratorio, encontramos que todas las constantes del gas tenían introducidos valores pertenecientes al aire, a pesar de que el gas de estudio era hidrógeno. Sin embargo al tener escogido como fluido de estudio el hidrógeno, la densidad sí se calculaba como en el hidrógeno, por lo que en el fondo el gas de estudio era una extraña mezcla de aire e hidrógeno.

Para corregir este error, simplemente buscamos los valores de las constantes del hidrógeno y las sustituimos por las que había, mejorando en gran medida los resultados.

6.2.3 Mallado

En el apartado de mallado tenemos dos opciones de malla, ambas muy similares, pero con sutiles diferencias y propósitos distintos.

La primera es una malla relativamente fina, con un millón y medio de elementos. La malla está más refinada en aquellos puntos donde necesitamos más información, como justo a la salida de la tobera. Además, a lo largo de todas las paredes tenemos un mallado de capa límite. Ésta es la malla que hemos usado en la enorme mayoría de los experimentos con dos entradas.

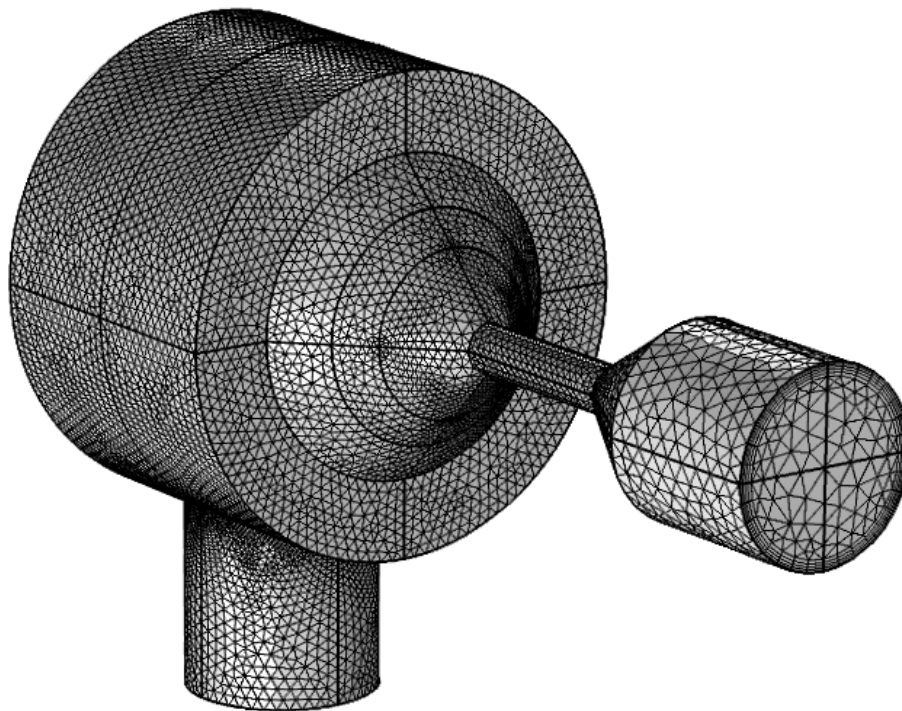


Fig. 6.7: Malla #1, aspecto exterior.

Partiendo de la primera malla hicimos una segunda malla mejor optimizada para los experimentos de una entrada. Como resultado obtuvimos una malla idéntica a la anterior pero con un mallado más grueso en la cámara de succión, reduciendo así el número de elementos en medio millón, lo cual nos permitió reducir los tiempos de simulación.

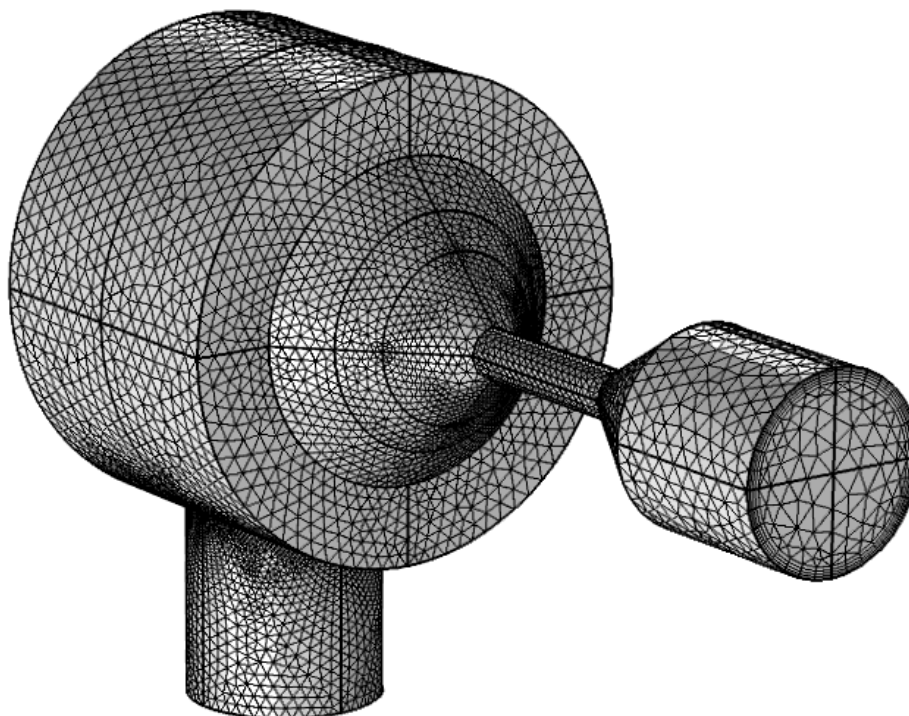


Fig. 6.8: Malla #2, aspecto exterior.

Además también hemos tenido que usar otras mallas, todas ellas más gruesas que las dos anteriores, en las ocasiones dónde no disponíamos de estudio previo del cual partir, con el fin de lograr la convergencia de un primer resultado para posteriormente pasar a mallas más finas.

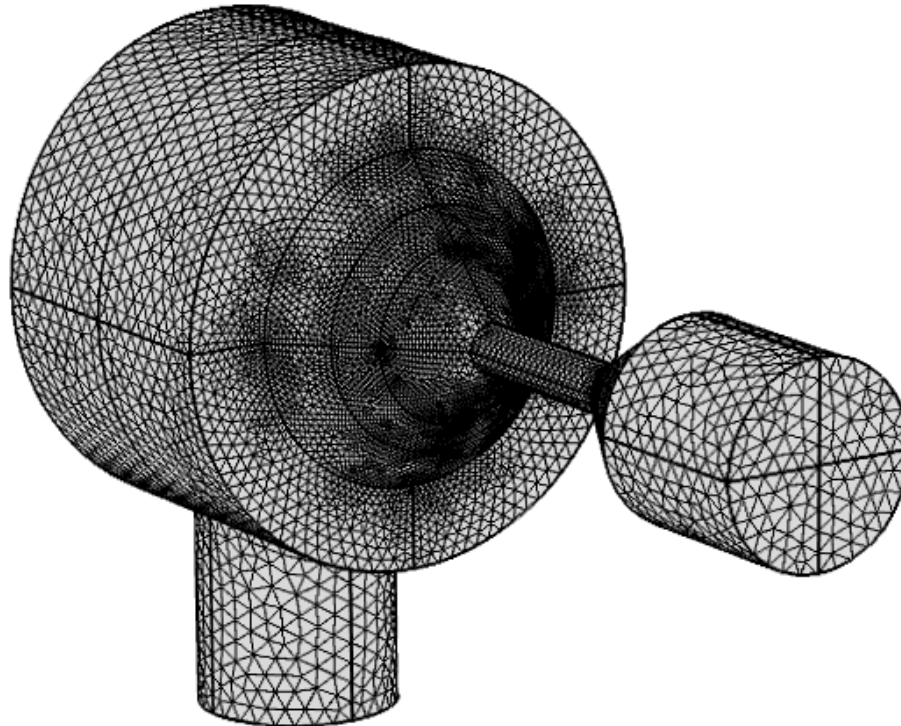


Fig. 6.9: Una de las mallas gruesas. Podemos apreciar como carece de mallado de capa límite.

6.2.4 Estudio

Tal como ya hemos comentado, en las simulaciones resulta muy útil disponer de un estudio previo que nos provea de una aproximación inicial de la solución que estamos buscando. Cabe decir que para que esta estrategia resulte factible, el estudio anterior debe guardar la mayor similitud posible con el que queremos lanzar.

En nuestro caso, hemos lanzado la mayoría de experimentos partiendo de un experimento previo que tenía dos de las tres presiones (la de la entrada primaria, la de entrada secundaria y la de salida) iguales y variando una de ellas en intervalos no superiores a 1 bar. En caso de no lograr la convergencia de la solución, reducimos el tamaño de ese intervalo para facilitar la simulación, aunque tengamos intención de registrar ese punto en nuestros experimentos.

En algunos casos no ha sido posible partir de un estudio previo, por lo que hemos tenido que lanzar experimentos con mallas bastante gruesas que faciliten la convergencia (las acabamos de ver en el apartado anterior). Una vez lograda la solución, la utilizábamos como aproximación para volver a lanzar el mismo estudio cambiando únicamente la malla.

Además hay muchos otros aspectos que se pueden cambiar de un estudio al siguiente: las propiedades del fluido de estudio, las condiciones físicas del sistema, el modelo físico utilizado para calcular los resultados, etc.

Dado que no nos interesa estudiar los transitorios de este sistema, todos los estudios han sido de tipo estacionario. El programa entonces nos devuelve automáticamente los resultados del flujo que se establece en el eyector en régimen estacionario.

Por último también tenemos la opción de seleccionar el método matemático de resolución que utiliza el programa a la hora de resolver la simulación. Hay muchos parámetros que podemos modificar al respecto, pero en nuestro caso lo hemos dejado todo por defecto.

6.2.5 Resultados

Ya para acabar, una vez tenemos nuestro estudio con los resultados, entran en juego las herramientas de visualización y procesado de datos que nos ofrece el programa.

Lo primero que hacemos es calcular los caudales de flujo primario secundario y de salida, mediante una integral de superficie en las caras correspondientes. Esto es lo más importante, dado que son los datos que podremos contrastar con los medidos en el laboratorio. Nótese que a pesar de necesitar sólo los caudales primario y secundario, también calculamos el de salida. Gracias a ello podemos comparar la suma de los caudales de entrada con el caudal de salida, teniendo una medida de la cuán fiable ha sido la simulación.

Los resultados de estas integrales aparecen en una tabla, desde la cual los llevamos a nuestra hoja de Excel directamente, y una vez allí los podemos comparar con los datos experimentales, y realizar los gráficos que consideremos oportunos.

Aleatoriamente, o cuando detectamos una irregularidad en los caudales, utilizamos herramientas gráficas para visualizar si está sucediendo alguna anomalía por lo que respecta al flujo. Con este fin hacemos graficas de colores representando la velocidad, el número de Ma, o la temperatura, así como representaciones de las líneas de corriente(ver figura 6.10).

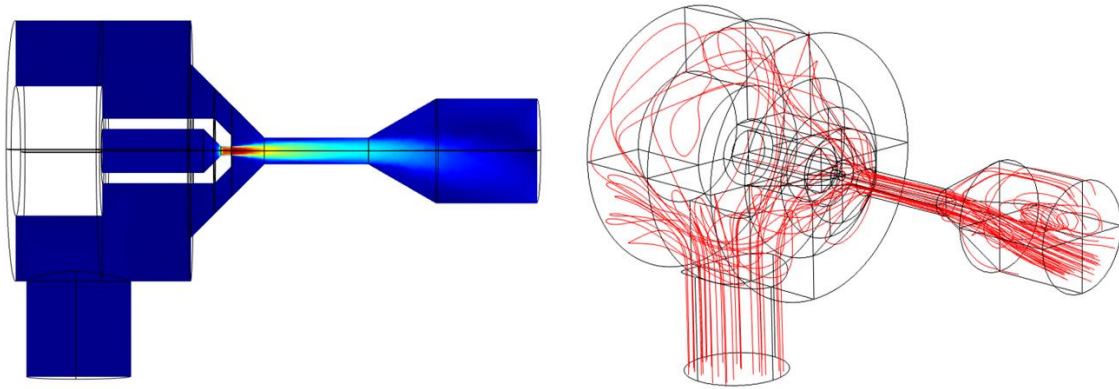


Fig. 6.10: En la izquierda: grafica de colores con el número de Ma; a la derecha líneas de corriente a través del eyector.

6.3 Simulación

Dado que los experimentos que estamos realizando simulan un flujo compresible y supersónico, tienen un coste computacional considerable, y en el caso de ejecutarse en un ordenador doméstico podrían tardar varias horas, durante las cuales se está ocupando gran parte de la capacidad de procesamiento de la máquina. Para evitar este problema, hemos hecho uso del clúster del que dispone el departamento de mecánica de fluidos para lanzar los procesos.

Para utilizarlo, lo primero que debemos hacer es subir los archivos de COMSOL (ya preparados para ejecutarse) al clúster. Esto lo hacemos mediante la ayuda de WinSCP, un software que nos permite transferir archivos entre sistemas informáticos.

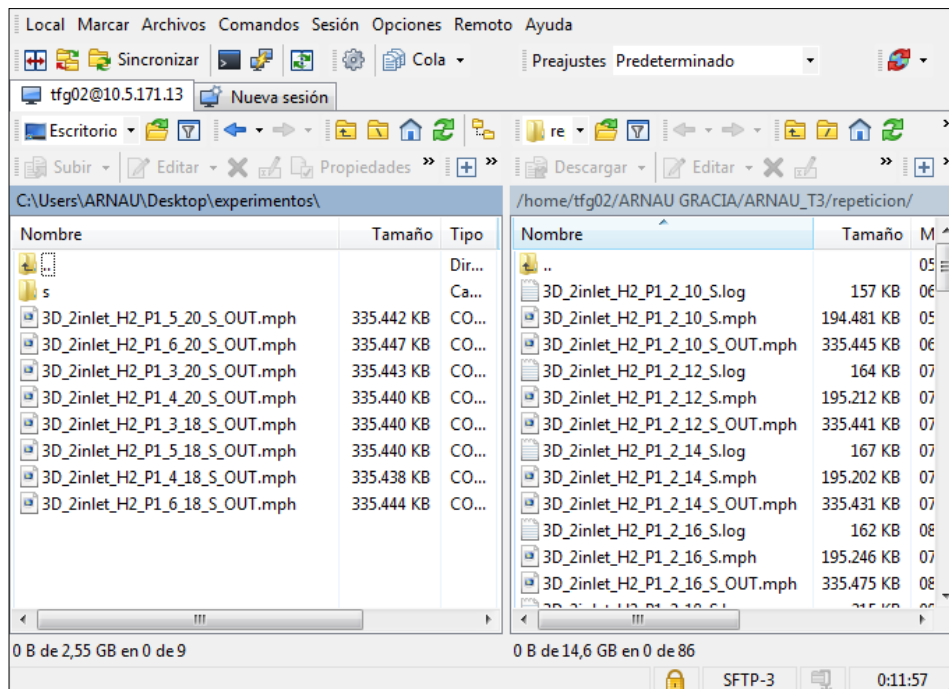


Fig. 6.11: Captura de pantalla de WinSCP. A la izquierda vemos los archivos presentes en el ordenador doméstico; a la derecha tenemos los archivos presentes en el clúster.

Una vez subidos los archivos, debemos ejecutar el archivo deseado en el software de COMSOL que hay instalado en el clúster. Esto lo hacemos mediante PuTTY, un programa que nos permite conectarnos al servidor del clúster y ejecutar comandos. Así pues, utilizamos un comando para lanzar los estudios con COMSOL, mediante el cual elegimos el nombre del archivo de entrada y del archivo de salida, así como el número de procesadores que deseamos emplear para computar la simulación. En nuestro caso hemos observado que a partir de 10 o 12 procesadores, los tiempos de computación ya no se reducen más.

```
login as: tfg02
tfg02@10.5.171.13's password:
Welcome to Ubuntu 16.04.6 LTS (GNU/Linux 4.13.0-41-generic x86_64)

 * Documentation:  https://help.ubuntu.com
 * Management:    https://landscape.canonical.com
 * Support:       https://ubuntu.com/advantage

Podeu actualitzar 44 paquets.
0 actualitzacions són actualitzacions de seguretat.

New release '18.04.2 LTS' available.
Run 'do-release-upgrade' to upgrade to it.

*** Cal que reinicieu l'ordinador ***
Last login: Fri May 10 01:55:01 2019 from 10.6.2.93
tfg02@Skidbladnir:~$ cd ARNAU\ GRACIA/
tfg02@Skidbladnir:~/ARNAU GRACIA$
tfg02@Skidbladnir:~/ARNAU GRACIA$
tfg02@Skidbladnir:~/ARNAU GRACIA$ clear
tfg02@Skidbladnir:~/ARNAU GRACIA$ nohup /home/tfg02/Comsol_53a/bin/comsol -np 4
batch -inputfile 3D_2inlet_H2_P1_6_20_S.mph -outputfile 3D_2inlet_H2_P1_6_20_S
_OUT.mph -study
```

Fig. 6.12: Captura de pantalla de PuTTY. En la pantalla negra escribimos los comandos.

El comando que escribimos para COMSOL, nos genera automáticamente un archivo de texto en el cual se va recogiendo toda la información referente al progreso de la simulación. Esto nos permite comprobar en tiempo real el progreso de la simulación mediante WinSCP.

Además, el mismo comando genera el archivo de salida de COMSOL con los resultados una vez terminada la simulación, por lo tanto, sólo necesitamos usar WinSCP para descargar dicho archivo de vuelta a nuestro ordenador, dónde lo abriremos y analizaremos los resultados.

7. EXPERIMENTOS

7.1 Introducción

En este tema veremos todas las tandas de experimentos que se han realizado, y explicaremos el motivo de cada una de ellas, así como sus particularidades. Antes, sin embargo, conviene explicar que en todos nuestros experimentos se han fijado siempre las condiciones de presión en las entradas y en la salida del eyector, con la finalidad de registrar así los caudales que se establecen para cada una de las condiciones de presión dadas.

En cuanto al eyector, existían dos configuraciones de geometría distintas, una de ellas pensada para trabajar con aire, y la otra optimizada para el hidrógeno, con algunas secciones de paso mucho menores. En nuestro caso, nos hemos centrado exclusivamente, tanto a nivel experimental como de simulación, en el estudio de esta segunda geometría pensada para hidrógeno. Asimismo hemos llevado a cabo todas las pruebas con hidrógeno.

Por último, cabe recordar que todos los experimentos se han hecho en régimen estacionario, como se ha comentado anteriormente.

7.2 Tandas

A continuación vamos a explicar las tres tandas principales, las cuales han supuesto la mayor parte del peso de experimentación y de simulación del proyecto. Estas tres tandas tuvieron que ser repetidas por completo en COMSOL después de que detectásemos un error en las propiedades del material (ver apartado 6.2.2).

7.2.1 Tanda #1

En esta primera tanda hemos estudiado el eyector con una sola entrada, la primaria. El objetivo de este primer estudio no ha sido otro que el de crear una base sólida en la cual podamos empezar a comparar los resultados experimentales y simulados en una configuración más sencilla y asequible que la de doble entrada. La idea fue que antes de intentar comparar el comportamiento del eyector con dos entradas, era mejor confirmar que podíamos predecir mediante simulaciones su comportamiento con una entrada con ciertas garantías. Así, en el caso de encontrar fuertes discrepancias podíamos intentar hacer algunas mejoras que poder aplicar también a la configuración de dos entradas.

En esta configuración de entrada única por el primario el eyector debería comportarse como una simple tobera convergente, por lo que tenemos una idea clara del aspecto que deberían presentar los resultados, tanto experimentales como computacionales (ver punto 4.1.1).

Para lograr esta configuración en el laboratorio, simplemente cerramos la válvula manual V2, anulando así por completo el caudal secundario. En el modelo computacional, lo que haremos será anular la condición de entrada de la cara por donde entra el flujo secundario, y definiremos dicha superficie como pared.

El procedimiento seguido en esta tanda #1 ha sido el siguiente:

1. Fijar la presión de entrada P_1 .
2. Variar la presión de salida P_{salida} desde 1bar (abs.) hasta llegar prácticamente al mismo valor de P_1 , siempre en intervalos no superiores a 0,5 bar.
3. Repetir el procedimiento para distintos valores de P_1 , desde 1,5 bar hasta 6 bar (abs.), cada 0,5 o 1 bar.

7.2.2 Tanda #2

Una vez que la tanda #1 nos había dado una buena base, en la tanda #2 abrimos ambas entradas para meternos ya de lleno en el comportamiento del eyector. En esta tanda buscamos reproducir en el eyector unas condiciones similares a las que podría encontrar una vez conectado a la pila. En concreto la pila del IRI trabaja con una presión de entrada óptima alrededor de unos 1,5 bar (abs.), y sabemos que al circular el hidrógeno por su interior sufre una pérdida de presión muy baja, casi despreciable

Si además recordamos del punto 4.3 que la pila se conecta al eyector uniendo la salida del eyector con la entrada de la pila, y la salida de la pila con la entrada secundaria del eyector, podemos preparar las condiciones de la tanda.

Según lo anterior, el procedimiento que hemos seguido en esta tanda #2 ha sido:

1. Fijamos la presión de entrada P_1 .
2. Variamos P_2 y P_{salida} manteniéndolas iguales desde 1 bar hasta 2 bar (abs.), en intervalos de 0,2 bar.
3. Repetimos con diferentes valores de P_1 , desde 2 bar hasta 6 bar (abs.), cada 1 bar.

7.2.3 Tanda #3

En esta tercera tanda, dado que ya habíamos estudiado en la tanda anterior al eyector trabajando en las condiciones demandadas por la pila, nos dedicamos a hacer un estudio algo más amplio de su comportamiento, rompiendo la relación de igualdad entre P_2 y P_{salida} .

En esta ocasión intentábamos buscar los distintos modos de funcionamiento en nuestro eyector, y pretendíamos ver si además del caudal primario también el secundario se puede bloquear, y en qué punto lo hace.

Para ello, optamos por fijar unas determinadas condiciones en las entradas, y variar la presión de contrapresión para ver cómo afecta ello a ambos caudales, siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Fijamos la presión P_1 en 3,5 bar, y la presión P_2 en 1,5 bar (abs.).
2. Empezamos con $P_{\text{salida}} = 1$ bar (abs.) y la vamos aumentando en intervalos no superiores a 0,1 bar hasta llegar al punto en que el flujo no se puede establecer porque las condiciones de contrapresión son demasiado elevadas, y se entra en el modo de mal funcionamiento.
3. Repetimos para $P_2 = 1,8$ bar y 1,2 bar (abs.).

7.3 Pruebas

Una vez ya realizadas las tandas de experimentos tanto en el laboratorio como en simulaciones, tuvimos tiempo para comparar y analizar los resultados, y en base a ello lanzamos algunas simulaciones adicionales en COMSOL para tratar de averiguar los posibles causantes de las desviaciones encontradas. A continuación veremos cuales fueron estas simulaciones, que perseguían y como se llevaron a cabo.

7.3.1 Prueba sin cámara de succión

La primera prueba que realizamos consistía en eliminar la cámara de succión de la geometría del eyector. Esto lógicamente se hizo sólo en la configuración de una entrada, ya que estábamos anulando toda la entrada del flujo secundario.

En este experimento pretendíamos evaluar los efectos que la cámara de succión pudiera tener sobre el flujo primario, pues creemos que podría alterar al flujo actuando como una especie de reserva del fluido que alteraría la presión que se encuentra el flujo justo al salir de la tobera. Además hemos visto que en las simulaciones el flujo adquiere un carácter aleatorio en la cámara de succión, por lo que podría ser un punto conflictivo en el modelo.

Para ello eliminamos algunas partes de la geometría, y tuvimos que convertir algunas caras en paredes:

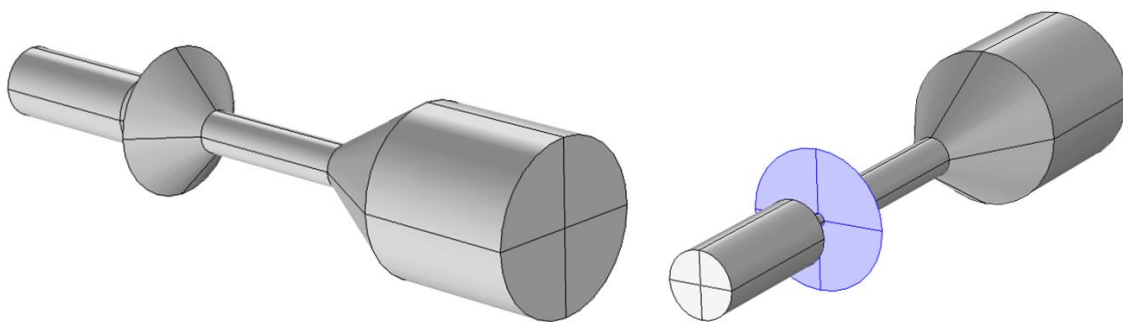


Fig. 7.1: Geometría del eyector con la cámara de succión anulada. En azul están destacadas las caras que pasaron a actuar como paredes.

Dado que hicimos cambios en la geometría del modelo, COMSOL no aceptaba los estudios previos como punto de partida, así que tuvimos que lanzar las simulaciones sin estudio previo.

Para ello tuvimos que crear una nueva malla más gruesa que ayudaría a obtener un resultado inicial.

Después de múltiples intentos con muchas mallas distintas, apenas lograron converger un par de simulaciones, las cuales presentaban resultados con muchas anomalías y difícilmente aprovechables:

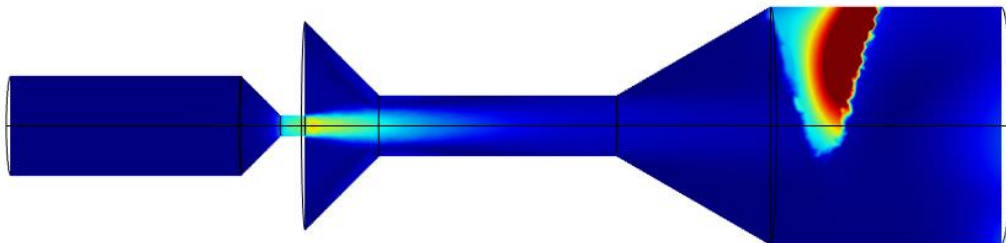


Fig. 7.2: Número de Ma representado mediante colores a lo largo de un plano 2D. A la derecha, en el difusor, podemos apreciar una importante anomalía fruto de algún fallo en la simulación.

Es por ello que estos experimentos no aparecen en el tema de resultados, pues no logramos que las simulaciones convergieran.

7.3.2 Prueba diámetro de garganta

En esta segunda prueba buscamos los efectos que un cambio en el diámetro de la garganta de la tobera (el punto de menor sección) podía ejercer sobre los flujos tanto primario como secundario. Así pues este experimento se llevó a cabo tanto con la configuración de una entrada como con la de dos entradas.

Sabemos que la garganta de la tobera en el eyector real tiene un tamaño de 0,4 mm, con una tolerancia de $\pm 0,05$ mm. Por ello probamos en cambiar dicho diámetro a 0,45 mm y a 0,35 mm en el modelo, para ver los efectos resultantes.

Igual que nos ocurría en el caso anterior, el cambio de geometría, a pesar de ser pequeño, no nos permitió coger los estudios anteriores como punto de partida, por lo que empezamos con mallas muy gruesas, y tuvimos que ir refinándolas.

En este caso sí que logramos convergencia, pero únicamente con el diámetro de 0,45mm. A partir de ahí reproducimos parte de la tanda 1 y de la tanda 2:

- En la tanda 1 aprovechamos esa primera simulación exitosa para replicar todos los resultados con $P_1 = 4$ bar (abs.) con la garganta modificada.
- En la tanda 2 aplicamos exitosamente esta modificación a todos los experimentos con $P_2 = P_{\text{salida}} = 2$ bar (abs.), aprovechando resultados de la tanda 1.

Estas pruebas nos permitirían sacar conclusiones bastante notables, como veremos en el tema próximo.

8. RESULTADOS

8.1 Introducción

En éste capítulo se han recogido todos los resultados fruto de la experimentación en el laboratorio y de todas las simulaciones realizadas con éxito durante el trabajo, y se han presentado en un formato que permita extraer la información que contienen.

Sobre la marcha se ha llevado a cabo una discusión acerca de las conclusiones que se pueden extraer a partir de ésta información, y se han planteado hipótesis que pueden explicar cada uno de los fenómenos encontrados.

El presente tema se ha dividido en dos partes, separando la configuración de una entrada y la de dos entradas, ya que a pesar de presentar algunas similitudes, nos proveen de una información suficientemente distinta como para separar su análisis.

8.2 Configuración de 1 entrada

Tal como hemos mencionado en el tema anterior, en ésta configuración anulamos el flujo secundario para estudiar únicamente el flujo primario. Es por ello que en ésta configuración el eyector presenta el comportamiento de una tobera convergente, y por lo tanto sabemos del punto 4.1.1, cuál es el comportamiento que cabe esperar.

8.2.1 Resultados tanda #1

A continuación se presentan los resultados experimentales (exp.) y los resultados computacionales (C.) de la primera tanda en una misma gráfica:

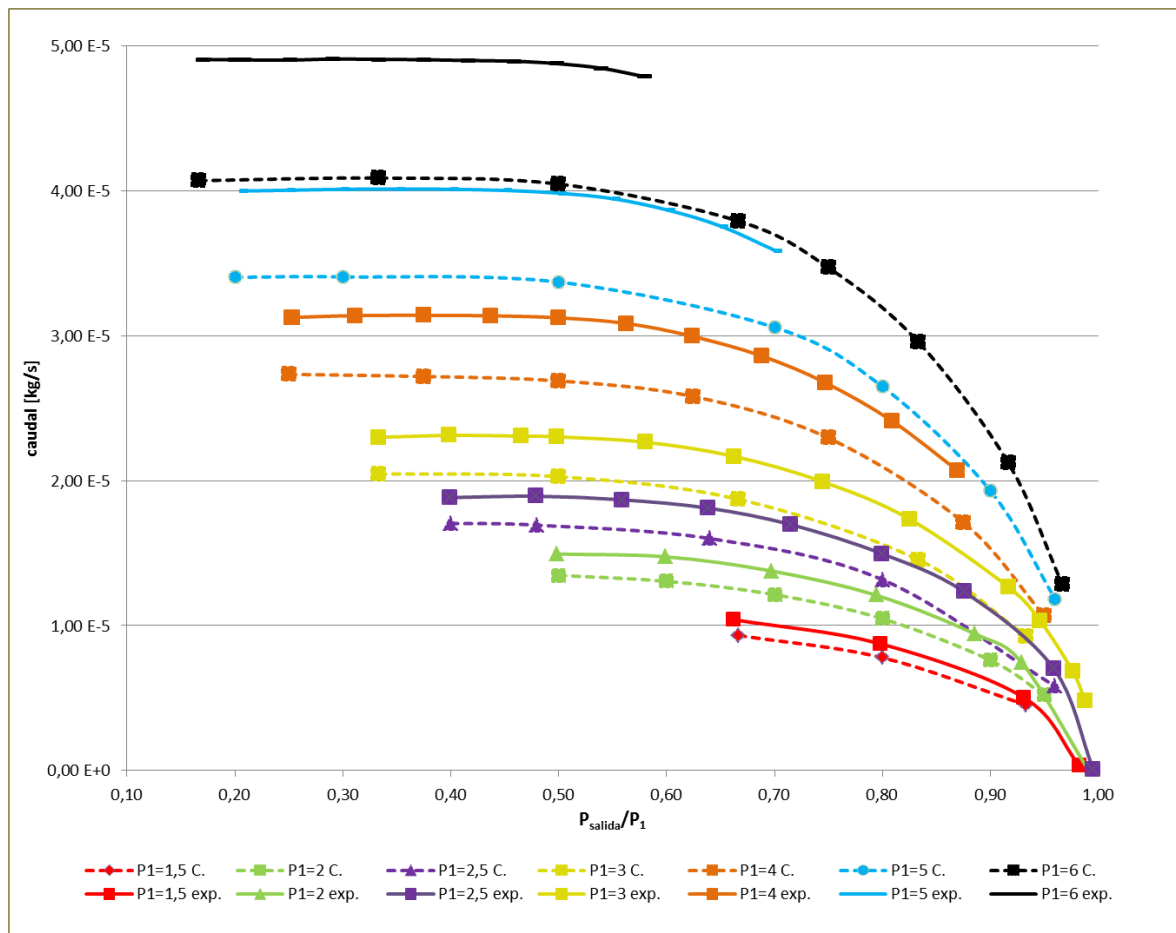


Fig. 8.1: Tanda #1, configuración de 1 entrada. Se representa el caudal másico en función de la relación de presiones entre la entrada y la salida. Todas las presiones son absolutas. Las líneas discontinuas corresponden a los datos de las simulaciones, y las líneas continuas corresponden a los datos experimentales. Cada color se corresponde con un valor distinto de presión de entrada.

Lo primero que podemos notar en la gráfica es que todas las curvas, tanto experimentales como simuladas, presentan el perfil típico de una tobera: vemos cómo el caudal crece a medida que disminuye la presión de salida, hasta llegar a un punto donde se estanca y se mantiene constante.

Por otra parte observamos que los resultados computacionales están ligeramente por debajo de los experimentales. Lo más curioso de esto es que encontramos que todos los caudales obtenidos mediante COMSOL están entre un 15% y un 19% por debajo de los experimentales.

8.2.2 Hipótesis tanda #1

Éste rango tan pequeño en los porcentajes del error nos hizo plantear varias hipótesis que fueran capaces de explicar una divergencia tan constante entre los resultados experimentales y los computacionales.

El primer candidato que pensamos que podía explicar las diferencias, fue el cambio de unidades aplicado al caudal experimental. Dado que los caudalímetros del laboratorio leen en l_n/min (litros normales por minuto) hay que hacer una conversión de unidades para poder

compararlos con los kg/s de las simulaciones, y un error en esa conversión podría haber explicado ese desfase constante en todos los datos. Sin embargo el único parámetro necesario para hacer la conversión es la densidad en condiciones normales del hidrógeno, la cual contrastamos mediante distintas fuentes y concluimos que tenía un valor acertado.

Habiendo descartado esa posibilidad, pensamos que los instrumentos de medida podían no estar bien calibrados y así estar ofreciendo valores erróneos todo el tiempo. Encontramos que el caudalímetro registraba un valor de unos 0,2 l_n/min cuando teníamos las válvulas totalmente cerradas, por lo que corregimos todos los caudales experimentales restándoles este “offset”. A pesar de que este cambio acercaba ambos caudales, apenas produjo cambios significativos, por lo que creemos que ésta hipótesis no logra explicar por sí sola el desfase de aproximadamente un 15%. Esta corrección ya está introducida en los datos de todas las gráficas de resultados del presente documento.

Otra de las hipótesis contemplaba que los sensores de presión no estuviesen midiendo la misma presión que determinamos en el modelo. Si nos fijamos en el modelo, las presiones se definen en las caras de entrada y salida, totalmente dentro del eyector, mientras que en el laboratorio, las presiones no se pueden medir en ese punto, sino en las líneas de entrada y salida. Esto podría hacer que cuando establecemos una determinada presión en el laboratorio, la presión que hay donde se ubicaría la cara correspondiente del modelo sea algo distinta, por lo que estaríamos comparando resultados que tienen en realidad presiones distintas. Esta hipótesis va en la línea de lo comentado en el punto 4.5.4. De todas formas este efecto no debería tener una influencia muy grande en los resultados, dado que la diferencia de presiones entre ambos puntos no debería ser muy grande.

A continuación consideramos la posibilidad de que la cámara de succión estuviese interfiriendo en el flujo primario de manera distinta en el modelo y en el laboratorio. Tal como vimos en el punto 7.3.1, esto nos llevó a intentar simular los experimentos sin la cámara de succión, para ver qué efectos podía llegar a tener sobre el caudal que se establecía. Como también vimos en ese punto, no se logró obtener resultados, por lo que ésta hipótesis no puede ser descartada como culpable de las desviaciones por el momento.

También tuvimos en cuenta que existe la posibilidad de que simplemente COMSOL no sea capaz de reproducir fielmente el flujo a través de un dispositivo de éstas características, y de que el modelo de turbulencia que utiliza (el k-ε) simplemente no reproduce todos los efectos del flujo real, lo cual le lleva en ésta circunstancia a subestimar el caudal.

Por último, se nos ocurrió pensar que el eyector real está fabricado con unas ciertas tolerancias en todas sus dimensiones, lo que hace que su geometría pueda divergir de la del modelo, que no tiene tolerancias y es “perfecto” geométricamente hablando. Dada la configuración de una entrada que estábamos estudiando, consideramos que el parámetro que más podía influir en el caudal era el diámetro de la garganta de la tobera, ya que es la sección de paso más estrecha a la que debe enfrentarse el flujo. Visto esto, nos centramos en lanzar una tanda de prueba en COMSOL para ver los efectos que el cambio de diámetro de la garganta podía tener sobre el caudal.

8.2.3 Resultados prueba diámetro de garganta tanda #1

Como ya vimos en el punto 7.3.2, el diámetro nominal de la garganta es de 0,40 mm, con una tolerancia de $\pm 0,05$ mm. Así pues probamos con ambos extremos de la tolerancia para ver la incertidumbre máxima que podía ocasionar éste parámetro en el caudal.

No obstante como ya dijimos sólo conseguimos resultados con el diámetro de garganta de 0,45 mm, los cuales se muestran en la siguiente gráfica:

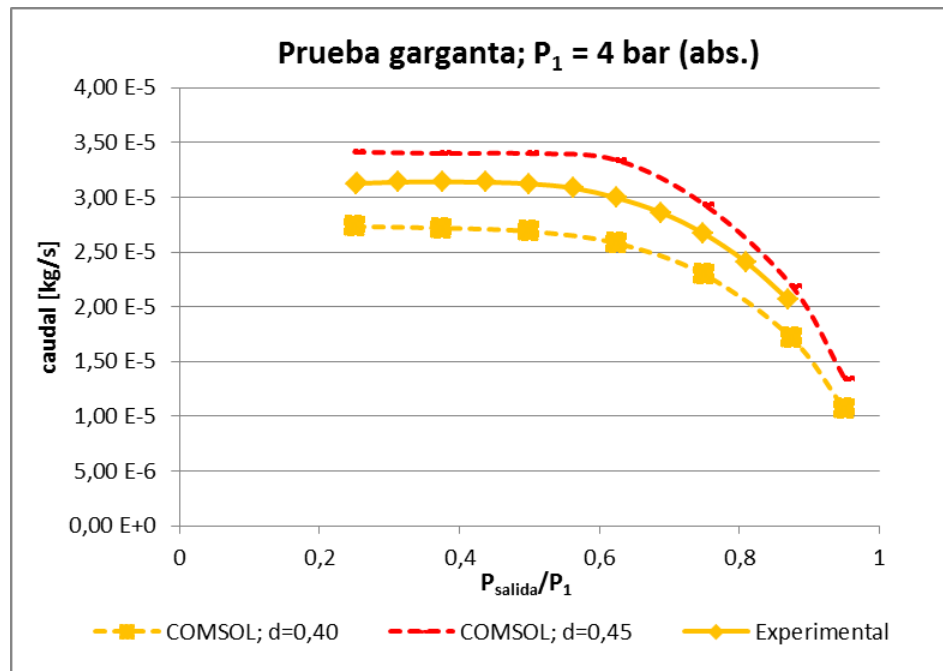


Fig. 8.2: Prueba de cambio de garganta, aplicada a la tanda #1. Se representa el caudal másico en función de la relación de presiones. Todas las presiones son absolutas. En naranja tenemos los datos "originales" de la gráfica anterior, en rojo tenemos los datos con la garganta modificada.

En la gráfica podemos apreciar cómo éste cambio de diámetro hasta el tope de tolerancia, no solamente acerca los resultados de COMSOL a los experimentales, sino que llega a superar el caudal experimental, aumentando el caudal computacional cerca de un 25%.

Esto es un claro indicio de que la divergencia observada en la tanda #1 podría explicarse en su totalidad por el hecho de que el eyector real no tiene una garganta de 0,40 mm exactos, sino que mide algo más, sin haber salido en ningún momento de la tolerancia con la que se fabricó.

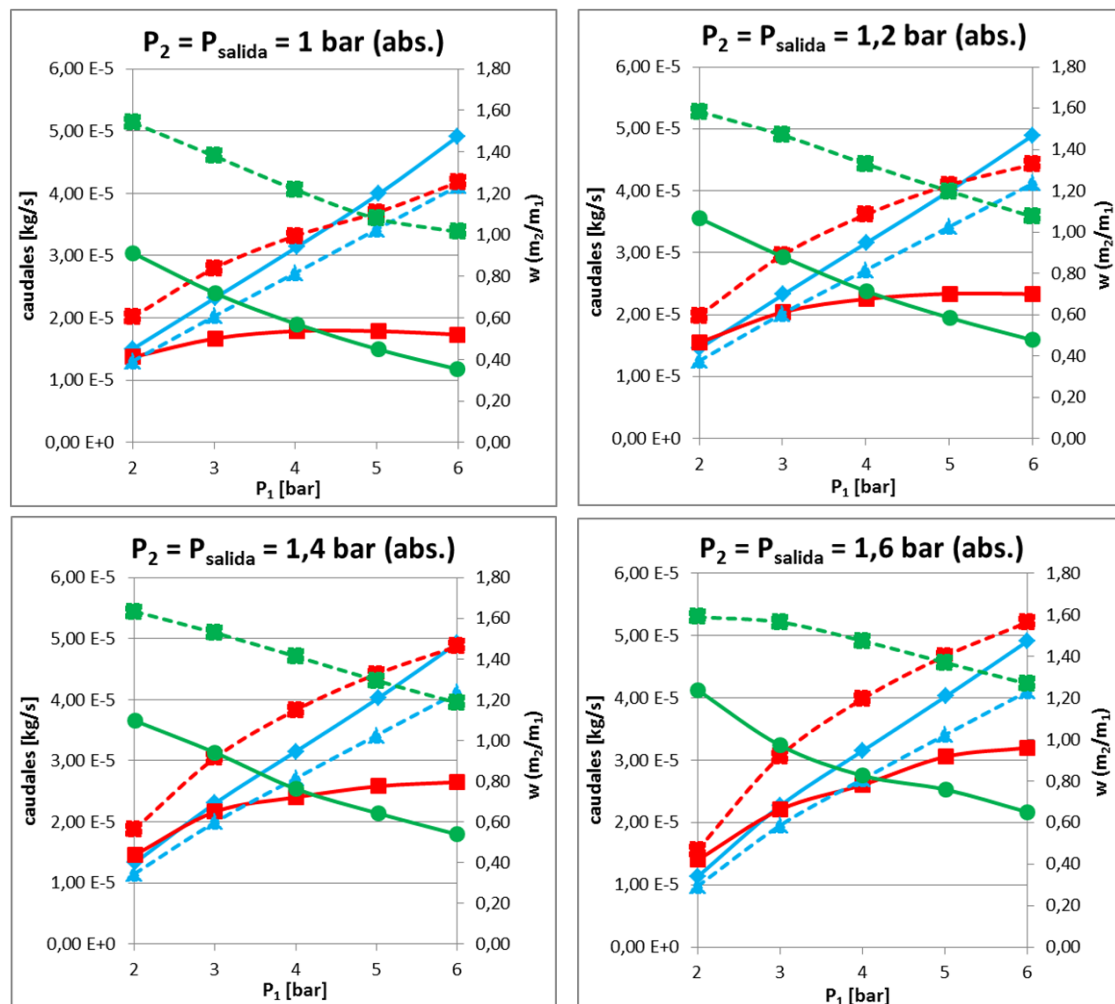
Ésta es por lo tanto la hipótesis que creemos que mejor puede explicar las divergencias entre resultados computacionales y experimentales. No obstante no podemos descartar la influencia adicional del resto de factores comentados en el punto anterior, pues por un motivo u otro no hemos sido capaces de cuantificar su efecto en los resultados, por lo que no podemos hacer afirmaciones acerca de dicho efecto.

8.3 Configuración de 2 entradas

En este apartado veremos los resultados obtenidos en la configuración de 2 entradas, que se corresponden con las tandas #2 y #3, y con la prueba de garganta en la tanda #2. En ésta configuración, a pesar de lo que se ha explicado anteriormente en el punto 4.4.1, no tenemos un conocimiento tan extendido como lo teníamos en la configuración anterior.

8.3.1 Resultados tanda #2

En ésta primera tanda de dos entradas, recordamos del punto 7.2.2 que se trataba de fijar $P_{\text{salida}} = P_2$ en distintos valores (los cuales se corresponderán con cada una de las gráficas), y variar el valor de P_1 (en el eje x de cada gráfica) para ver que influencia tiene sobre ambos caudales.



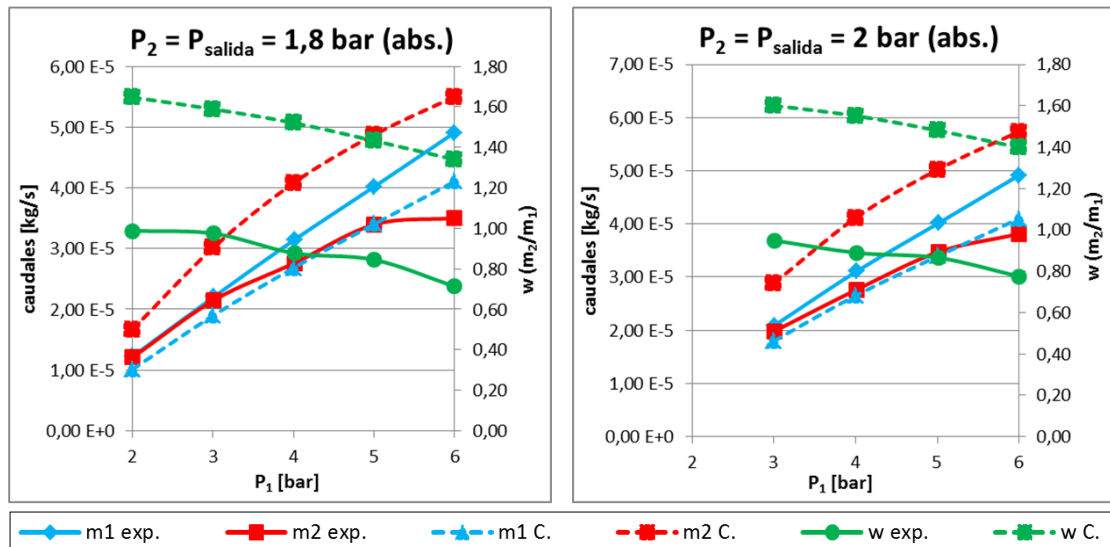


Fig. 8.3: Tanda #2, configuración de 2 entradas. Se representan los caudales másicos primario (en azul) y secundario (en rojo) en el eje vertical izquierdo, y el ratio de succión (en verde) en el eje vertical derecho, todos en función de la presión P_1 . Todas las presiones son absolutas. Las líneas continuas corresponden a los datos experimentales y las discontinuas a los simulados.

En todas las gráficas el caudal primario crece de una manera muy lineal según lo hace la presión del primario, lo cual tiene bastante sentido, ya que son dos magnitudes directamente vinculadas. Además, también se observa como los caudales primarios experimentales están alrededor de un 15% por encima de los de COMSOL, lo cual nos hace sospechar que puede estar ocurriendo lo mismo que en la configuración de 1 entrada.

Por lo que respecta al caudal secundario, éste también presenta una tendencia a crecer según lo hace la presión P_1 , pero en su caso, lo hace de forma cada vez más lenta, llegando a estancarse. Este puede ser un claro indicativo de que estamos entrando en el modo crítico del eyector. Si comparamos los resultados experimentales con los computacionales, podemos ver que los primeros presentan ese carácter asintótico de una forma mucho más pronunciada, mientras que en COMSOL parece que el caudal sigue creciendo. Esto es más evidente en las primeras gráficas, con presiones $P_2 = P_{salida}$ más bajas, aunque se puede apreciar en todas ellas.

Por otra parte, si obviamos la zona de las gráficas donde se produce ese estancamiento del caudal secundario, también se aprecia que el caudal experimental queda aproximadamente un 45% por debajo del de las simulaciones en todas las gráficas.

Finalmente el ratio de succión (w) se reduce a medida que aumentamos la presión en el primario, lo cual nos indica que dicha presión tiene un mayor efecto sobre el caudal primario que sobre el caudal secundario, cosa que cabía esperar. Las curvas experimentales y computacionales en este caso son paralelas en todas las gráficas. Al ser éste un parámetro derivado de los dos caudales anteriores, sabemos con certeza que ambas líneas coincidirán siempre que lo hagan las de caudal primario y secundario.

Cabe recordar que ésta tanda pretendía reproducir las condiciones en las que se encontraría el eyector una vez conectado a la pila, y respecto a ello se podría afirmar lo siguiente: Dadas las condiciones de suministro de presión a la pila (P_{salida}), y por consiguiente de presión en el

secundario (P_2), se puede decir que al subir la presión en el primario aumentamos ambos caudales. Además, se puede concluir de comparar las gráficas entre ellas que una vez fijada la presión en el primario, el caudal primario, que es el caudal neto que consume la pila, se mantiene constante para todas las presiones de salida de ésta tanda, ya que está bloqueado. No obstante, al subir la presión P_1 , el ratio de succión baja, pudiendo perder en cierto grado algunos de los beneficios derivados de la recirculación (ver punto 2.4.1). Por último también podemos apreciar, sobre todo en las primeras gráficas, como el caudal secundario llega a un punto en el cual deja de crecer, lo cual nos está indicando dónde empieza el modo crítico del eyector.

8.3.2 Hipótesis tanda #2

Para explicar el desfase en el flujo primario, mantenemos las mismas hipótesis que en la configuración de 1 entrada, ya que el error registrado sigue siendo el mismo (15%). Por otra parte podríamos también considerar la posibilidad de que los efectos que tiene un flujo sobre el otro no se resuelvan correctamente en COMSOL, creando así el caudal secundario un impedimento adicional sobre el caudal primario que no se da en la realidad.

En cuanto al caudal secundario, la primera idea que se nos ocurrió, fue probar si el cambio en la tobera que hicimos en la prueba de una entrada también podía influir en el caudal secundario. La hipótesis es que el hecho de tener un diámetro mayor en la garganta podría hacer que la succión creada por el eyector fuera menor, induciendo así caudales secundarios inferiores en la realidad respecto a los simulados. Para comprobarlo, aprovechamos soluciones de la prueba con una entrada para lanzar simulaciones con dos entradas y la garganta modificada, tal como veremos en el siguiente punto.

Otro de los motivos que creímos que podía explicar las diferencias en el caudal secundario, era algún tipo de fallo en los sensores de presión y caudal de la línea secundaria. Los sensores de presión fueron descartados rápidamente ya que antes de empezar con cada experimento se comprobó que los tres sensores de presión medían la misma presión cuando no circulaba caudal, por lo que es poco probable que los tres sensores fallasen a la vez (ver apartado 5.3). Por otra parte los caudalímetros podían tener a priori la explicación de las discordancias, ya que tienen un caudal máxico máximo que pueden medir, y en el caso de haber llegado a este máximo, se podría justificar el estancamiento del caudal secundario experimental como consecuencia de un fallo. No obstante estuvimos comparando los valores de caudal máximo del sensor de caudal secundario ($50 \text{ l}_n/\text{min} \approx 4,50 \text{ E-5 kg/s}$) con los caudales de la tanda, y en ningún momento se acercan éstos últimos al límite del sensor, por lo que ésta explicación queda descartada. De esta manera, mantenemos la hipótesis de que el estancamiento se produce por el simple hecho de entrar en el modo crítico del eyector. Además, los caudalímetros usados son de gran calidad, y aunque pudieran estar ligeramente mal calibrados, no creemos que se pudieran generar desviaciones tan altas como un 45%.

Por otra parte está la hipótesis que hemos comentado en la configuración de una entrada, según la cual las presiones establecidas o leídas en el caso computacional y en el experimental podrían no ser las mismas, dado que van referidas a puntos ligeramente distanciados (ver

punto 4.5.4). A esto se le suma el posible efecto que las T y las X colocadas justo en las tomas de presión podrían tener sobre las lecturas experimentales. Como también hemos comentado en la tanda anterior, no deberíamos ver grandes cambios en la presión por éste motivo, ya que los puntos están relativamente cerca. Además, los resultados coinciden bastante bien en cuanto a presiones, las divergencias realmente están en los caudales.

Tal como se comentó en el punto 8.2.2, las simulaciones no siempre son capaces de reproducir toda la complejidad del proceso real, por lo que pueden incurrir en errores. En el caso del flujo secundario, es probable que COMSOL y el modelo $k-\epsilon$ que implementa no sean capaces de resolver de manera realista una situación como la del caudal secundario, donde aparecen cambios de dirección bastante bruscos en el flujo, y dónde tenemos esa cámara de succión que da al flujo un carácter tan impredecible.

Finalmente, siguiendo en la línea de lo que planteamos en la configuración de una entrada, creemos que las diferencias en el caudal secundario podrían también explicarse por el hecho de tener dos geometrías algo distintas en el modelo y en el eyector real. En este caso estaríamos hablando de parámetros geométricos que pudiesen influir al caudal secundario, como el diámetro de la entrada secundaria, o las dimensiones de la cámara de succión. Además, también podríamos considerar el efecto de las tolerancias constructivas en las secciones de paso de la zona de mezcla y del difusor, que podrían tener mayor influencia en el caudal secundario que en el primario. Sin embargo, las tolerancias en estas zonas son mucho más pequeñas en relación a sus magnitudes nominales, por lo que el efecto de considerarlas podría no ser tan grande como lo fue en la garganta.

8.3.3 Resultados prueba diámetro de garganta tanda #2

Para comprobar los efectos del cambio en la garganta en el flujo secundario, aprovechamos los resultados de la prueba anterior para repetir parte de la tanda #2, en concreto repetimos la última gráfica ($P_2 = P_{\text{salida}} = 2 \text{ bar}$) con la garganta de 0,45 mm, y aquí están los resultados superpuestos encima de los anteriores, para poder compararlos:

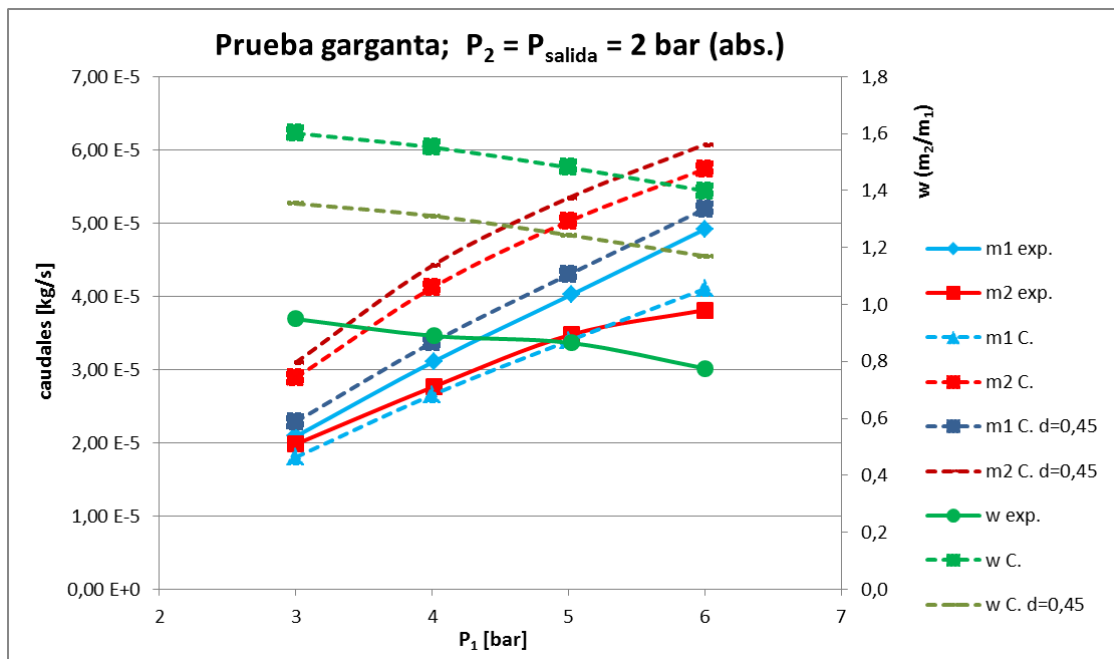


Fig. 8.4: Prueba de cambio de garganta, aplicada a la tanda #2. Las leyendas, los datos, y los ejes son los mismos que en la tanda #2, pero los colores azul oscuro, granate, y verde oscuro se corresponden con las simulaciones de garganta modificada. Todas las presiones son absolutas.

En lo que respecta al flujo primario, podemos ver como el cambio de garganta ha tenido exactamente el mismo efecto que en la configuración de una entrada, aumentando un 25% dicho caudal. Podemos concluir pues que las diferencias en el flujo primario en ésta configuración, también pueden explicarse por las tolerancias de fabricación del eyector, aunque no por ello se descartan el resto de hipótesis, ya que no se han probado por ahora.

En lo que se refiere al flujo secundario no podemos afirmar lo mismo, de hecho el caudal secundario ha aumentado ligeramente, contrariamente a nuestra hipótesis, alejando aún más la curva computacional de la experimental. Esto es un indicio claro de que podemos descartar la tolerancia de la garganta como causante de las desviaciones de caudal secundario. Además es una hipótesis que no logra explicar el bloqueo que manifiesta el caudal experimental, que no vemos en el caudal simulado. En resumen, podemos descartar la opción de las tolerancias de la garganta como causantes de las divergencias en el flujo secundario.

8.3.4 Resultados tanda #3

En esta tercera y última tanda teníamos la intención de estudiar el comportamiento más general del eyector. Para ello establecimos una presión de 3,5 bar (abs.) en la entrada primaria, y fijando la presión de la entrada secundaria en tres valores distintos, variamos la presión de salida para visualizar su efecto sobre los caudales (ver punto 7.2.3).

A continuación se muestran tres gráficas, correspondientes con las tres presiones en la entrada secundaria, con los resultados:

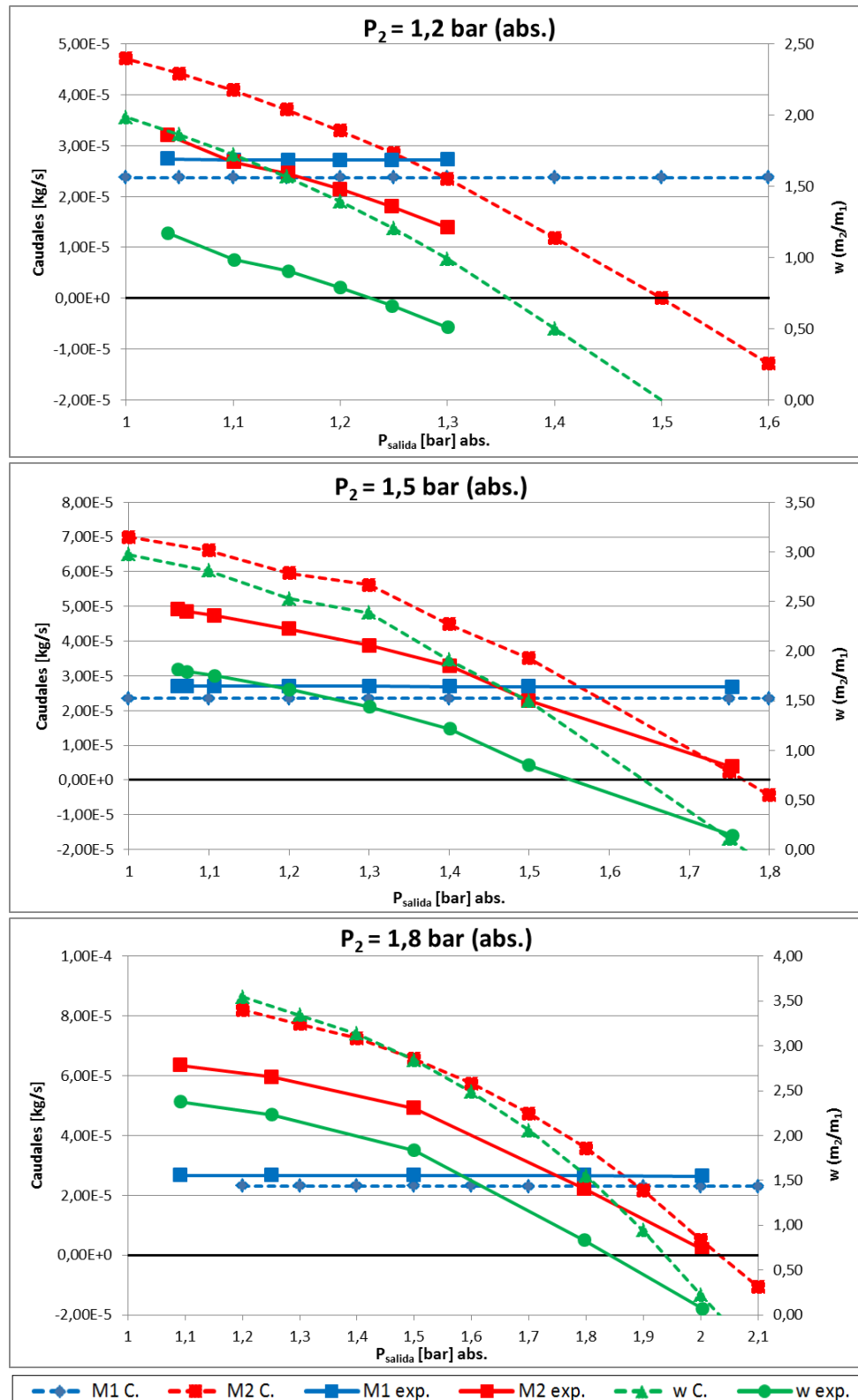


Fig. 8.5: Tanda #3, configuración de 2 entradas. Las líneas continuas se corresponden con los resultados experimentales, y las discontinuas con los resultados de COMSOL. Se representan los caudales máximos primario (en azul) y secundario (en rojo) en el eje vertical izquierdo, y el ratio de succión (en verde) en el eje vertical derecho, todos en función de la presión de salida. Todas las presiones son absolutas.

Una de las cosas que apreciamos con mayor claridad en estas graficas es que el caudal primario está totalmente bloqueado en los tres casos, para el rango de presiones de salida que hemos establecido, algo similar a lo que ocurrió en la tanda #2. También presenciamos en este

caso que los caudales primarios computacionales vuelven a estar un 15% por debajo de los experimentales, cosa que sabemos con bastante certeza que se podrá justificar por las tolerancias de fabricación de la garganta.

En lo referente al caudal secundario podemos apreciar en los tres casos su subida a medida que bajamos la presión de salida, y especialmente en la gráfica con $P_2 = 1,8$ bar, se intuye que a muy bajas presiones el caudal tiende a frenar su crecimiento, estancándose. Por lo contrario, a presiones de salida elevadas el flujo se anula, e incluso se invierte en el caso computacional. Esta inversión no se produce en los datos experimentales dado que tenemos válvulas anti retorno colocadas en el sistema.

En ésta tanda, hemos vuelto a encontrar que en las tres gráficas, el caudal secundario computacional está aproximadamente un 45% por encima del experimental, tal como ocurría en la tanda anterior.

Así pues esta tanda nos ha permitido ver el modo de retorno o mal funcionamiento del eyector, y el por supuesto el modo sub-crítico. Además nos ha permitido intuir el bloqueo en el caudal secundario, pero a diferencia de la tanda anterior, la forma en la que está planteada no nos permite percibir de forma tan clara el modo crítico.

8.3.5 Hipótesis tanda #3

Sabemos que las divergencias en ambos caudales son las mismas que en la tanda #2, a excepción de que en este caso los caudales secundarios no presentan comportamientos distintos, ya que no visualizamos el modo crítico.

No obstante ambos casos son muy similares, y por lo tanto se consideraron las mismas hipótesis planteadas para la tanda #2.

En la tanda #3 no hemos tenido tiempo para aplicar ninguna modificación, ni la de la garganta ni otras que teníamos en mente, pero no obstante podemos afirmar que, dado que seguimos estando en la misma configuración de doble entrada que la de la tanda #2, los resultados de aplicar el cambio de diámetro de la garganta serían muy parecidos. En lo que se refiera al resto de hipótesis quedan pendientes de demostración.

8.4 Simulaciones fallidas

Antes de acabar con éste tema, hemos querido hacer un pequeño análisis de las simulaciones que a pesar de haber convergido dieron resultados que tuvimos que despreciar por ser poco fiables y por presentar anomalías.

Algunas de estas simulaciones fallidas se producían de forma “aleatoria”, probablemente por condiciones esporádicas de falta de capacidad de computación disponible en el clúster. Otras,

simplemente se producían por fallos humanos a la hora de introducir los datos en el modelo. Sin embargo la mayoría estos fallos computacionales se manifestaron en dos situaciones:

1. En la tanda 3, cuando intentamos reproducir simulaciones con la presión de salida muy baja. En estos casos el flujo parece alcanzar velocidades cercanas a la del sonido en la cámara de mezcla.
2. Cuando partíamos de un estudio previo poco fiable, o que guardaba poca semejanza con el estudio lanzado, cosa que obligaba al software a tener que dar un salto muy grande en cuanto a las condiciones de contorno de las que partía.

La mayoría de estos fallos se detectan cuando vemos que la suma de caudales de entrada diverge bastante del caudal de salida. En cuanto identificamos esa divergencia, hacemos mapas 2D de colores visualizando el número de mach, y en ocasiones la temperatura. A continuación vemos un ejemplo del aspecto que suelen tener estos mapas:

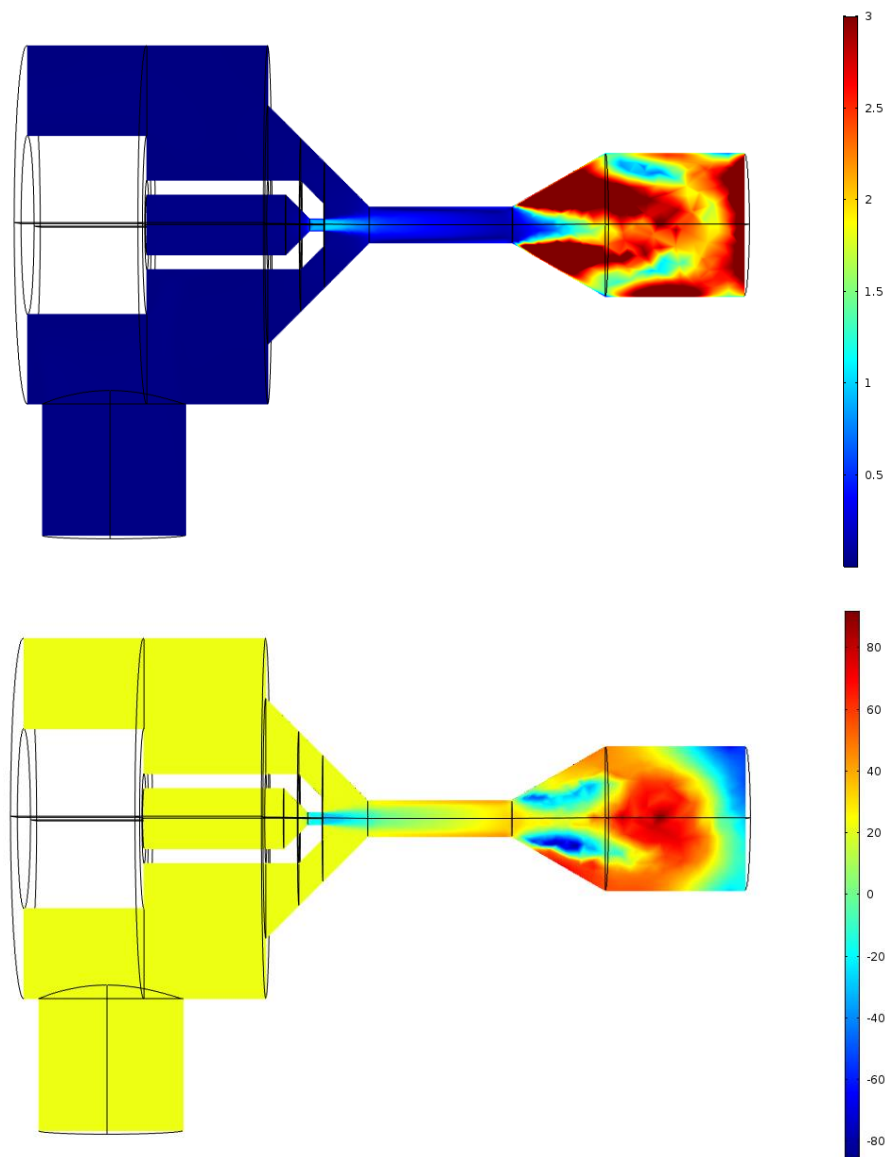


Fig. 8.6: Resultados típicos obtenidos en una simulación errónea correspondiente a la situación 1. En la imagen superior tenemos el número de Mach y en la imagen inferior la temperatura en °C.

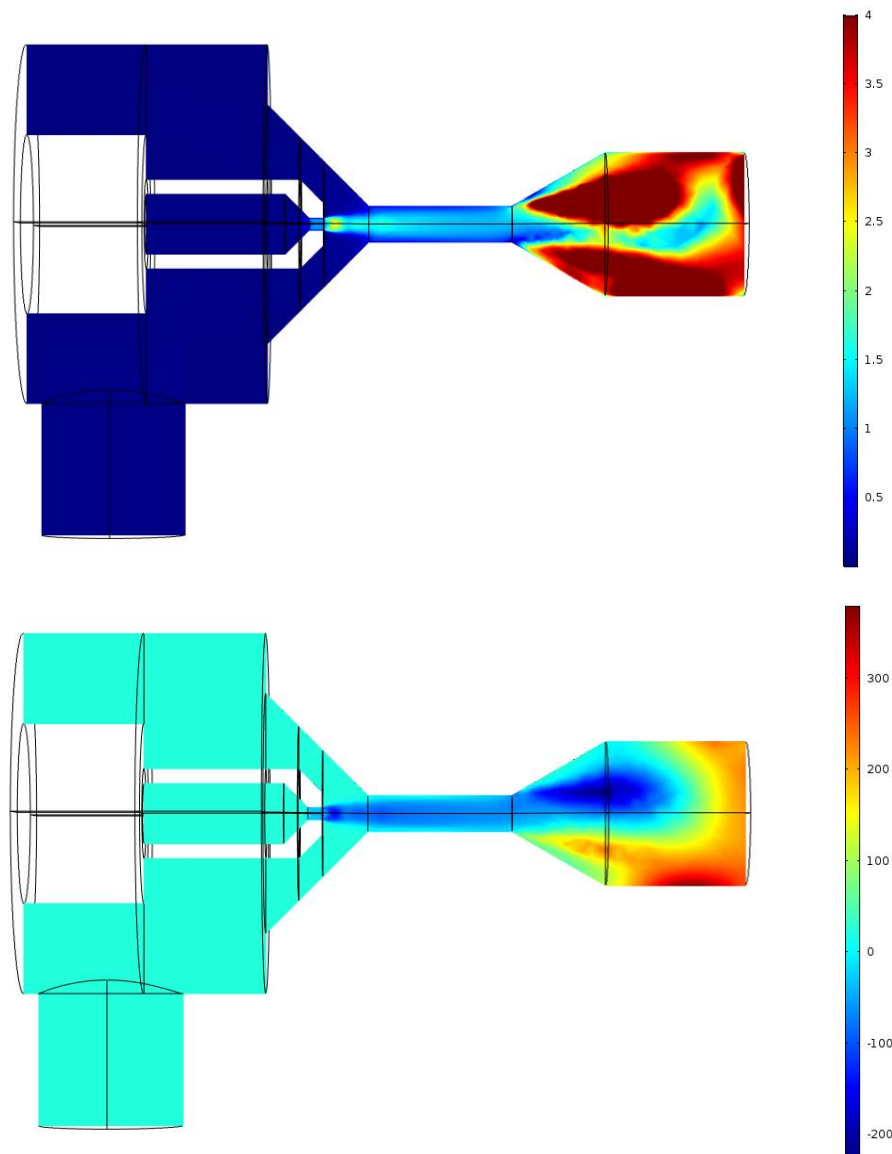


Fig. 8.7: Resultados típicos obtenidos en una simulación errónea correspondiente a la situación 2. En la imagen superior tenemos el número de Mach, y en la imagen inferior la temperatura en °C.

En la primera situación podemos apreciar que el hecho de intentar reproducir presiones muy reducidas en la salida provoca que el flujo sea muy rápido en la zona de mezcla. Esto hace que al llegar el flujo en condiciones supersónicas al “difusor”, que supuestamente debería ralentizarlo, la velocidad aumente todavía más (según lo visto en el punto 4.1.2), por lo que el difusor pasa a actuar como una tobera divergente. El problema de esto es que el modelo no está preparado para observar velocidades supersónicas en ese punto, ya que en la salida tenemos establecida una condición de flujo subsónico. Ello acaba haciendo que el programa falle al evaluar el flujo en ese punto, dando lugar entre otras cosas, a temperaturas extremas, tal como apreciamos en la figura 8.6.

En la segunda situación encontramos algo distinto en cuanto a la velocidad en la cámara de mezcla. En estos casos el flujo se mantiene subsónico en dicha región, pero aun así el programa encuentra dificultades para simular el flujo en el difusor. Esto nos hace sospechar

que, aparte de que en algunas ocasiones el difusor pueda actuar como una tobera divergente, también supone el principal punto débil del resto de simulaciones en general, ya que todas las simulaciones fallidas que hemos sido capaces de presenciar presentaban anomalías en el mismo punto: el difusor.

Creemos que en esa zona podría estar produciéndose, además de la aceleración supersónica del fluido, un desprendimiento de la capa límite, ya que el ángulo del difusor es bastante pronunciado, y el flujo podría encontrar dificultades para mantenerse en contacto con las paredes, cosa que podría suponer una importante dificultad a la hora de que el modelo computacional resuelva el flujo, dando lugar a los errores que presenciamos.

9. CONCLUSIONES

9.1 Conclusiones

El presente trabajo partió de un modelo tridimensional del eyector de estudio que era perfectamente funcional, pero que según pudimos ver después de los primeros resultados, no era capaz de replicar la realidad observada en el laboratorio. Poco a poco se fueron introduciendo cambios en el modelo que corregirían su comportamiento, acercando cada vez más los resultados de las simulaciones a los del laboratorio.

El primer cambio consistió en corregir los valores de todas las propiedades del hidrógeno que no eran correctos, que hacían que el modelo estuviese trabajando con un gas muy poco real, con propiedades del aire y del hidrógeno mezcladas. Con este cambio las simulaciones mejoraron mucho sus resultados, llevando las diferencias en caudal primario desde un 200% hasta un 15%, y desde un 500% hasta un 45% en el caudal secundario.

Posteriormente también detectamos un error en el mallado del modelo, el cual tuvimos que corregir. Este fallo no parecía influir demasiado en los resultados, pero no obstante se corrigió de todas formas, pues introducía una geometría en la malla que no existía en la realidad.

A modo de prueba también se cambió la sección de paso de la garganta de la tobera, para poder visualizar los efectos que ejercía sobre ambos caudales. Descubrimos que, sin sobrepasar las medidas de la tolerancia de fabricación, el caudal primario podía variar hasta un 25%. Esto nos lleva a la conclusión de que el valor del caudal primario tiene al menos un 25% de incertidumbre debida únicamente a sus tolerancias de fabricación.

Nos encontramos pues en un punto en el cual hemos conseguido dar una explicación razonable a las variaciones del 15% en el caudal primario, aunque podrían no ser las únicas.

En lo referente al caudal secundario, no hemos conseguido confirmar el motivo por el que divergen los resultados computacionales y experimentales, pero sí que hemos sido capaces de eliminar algunas hipótesis, y de plantear nuevas ideas que podían explicar dicha divergencia.

En conclusión, no hemos logrado obtener un modelo tan fiel a la realidad como nos hubiese gustado, pero sí hemos conseguido mejorar el modelo de manera significativa, no solo por el hecho de acercar los resultados, sino sobre todo por haber conseguido unas divergencias tan constantes en el tiempo, que nos permiten corregir las curvas si aplicamos un simple factor a todos los caudales.

Por otro lado, al margen de la fidelidad del modelo, que era nuestro objetivo principal, también hemos logrado en el transcurso del trabajo descubrir muchas de las características que presentan los eyectores, sobretudo del nuestro.

En primer lugar, tal como acabamos de ver, hemos comprobado la gran importancia que tiene la geometría interna de este dispositivo en su funcionamiento. Gracias al cambio que realizamos en la garganta, hemos visto que a la hora utilizar un eyector en cualquier aplicación, resulta crucial conocer con la mayor precisión posible las medidas reales que tiene nuestro eyector, ya que cambios pequeños pueden afectar bastante su comportamiento. Esto implica que, si por ejemplo se quiere emplear un eyector para la recirculación de hidrógeno en un coche, algunas de las piezas de ese eyector deberán ser fabricadas con tolerancias muy pequeñas, si se quiere garantizar que funcionarán de igual manera en todos los coches.

Por otra parte hemos logrado confirmar y registrar los modos de funcionamiento de nuestro eyector, lo cual nos ha ayudado a entender cómo funciona cada una de éstas fases y qué le ocurre internamente al fluido. Esto resulta bastante importante dado que en la búsqueda de información no logramos encontrar casi nada de documentación referente a estos modos de funcionamiento en eyectores de tobera convergente, y después de este trabajo tenemos dicha información contrastada con experimentos y simulaciones.

Finalmente también cabe recordar que hemos recopilado mucha información sobre cómo debería funcionar éste eyector una vez conectado a la pila de combustible. Estos datos podrían no ser totalmente reales cuando conectemos la pila, ya que los sistemas reales humidifican el gas, cosa que podría influir en cierta medida a los resultados que se obtengan (ver punto 4.4.2), pero no obstante hemos fundado una buena base desde la cual se podría hacer un estudio con el hidrógeno humidificado.

9.2 Trabajos futuros

Como hemos ido viendo a lo largo de este escrito, en el transcurso del trabajo han ido surgiendo nuevas dudas y curiosidades, algunas de las cuales no se han resuelto, y podrían ser objeto de proyectos futuros. En éste punto se hablará acerca de las posibles continuaciones que se le podrían dar al trabajo.

En primer lugar, la continuación más importante que podría hacerse sería intentar confirmar o desmentir cada una de las hipótesis que han quedado en el aire en el capítulo de resultados.

En ese aspecto se podría empezar por repetir las 3 tandas en el laboratorio, con todos los instrumentos recién calibrados, para verificar que ninguna de las lecturas fue errónea.

También podría ser muy interesante repetir las simulaciones usando otro modelo de turbulencia, si fuera necesario usando otro programa de simulación. Esto nos permitiría contrastar los datos de diversas simulaciones distintas, y valorar la fidelidad que cada modelo guarda con la realidad en diferentes aspectos. En ésta misma línea podríamos probar con crear múltiples mallas en cada modelo, evaluando la efectividad de cada una de ellas. También sería de gran interés probar a repetir todas las simulaciones de este trabajo con una versión posterior de COMSOL, ya que en cada versión se mejoran tanto los modelos matemático-

físicos como las rutinas de cálculo, por lo que resultaría interesante ver si los resultados han mejorado, o si al menos convergen con más facilidad.

Dado que no hemos sido capaces en este trabajo, valdría la pena intentar que convergiera alguna simulación con la geometría de la cámara de succión eliminada, para poder comparar los resultados con y sin cámara de succión, y así poder ver el efecto que ejerce sobre el flujo primario (configuración de 1 entrada). Para estudiar los efectos que la cámara de succión tiene sobre el flujo secundario (configuración de 2 entradas), sería muy interesante intentar modificar sus dimensiones, y realizar estudios con cámaras de distinto volumen.

En nuestro caso nos hemos limitado a ver los efectos de un cambio en el diámetro de la tobera, dentro de su tolerancia, pero como ya hemos dicho en el punto 8.3.2, éste tipo de estudio podría extenderse a cualquiera de los parámetros geométricos del eyector, con especial interés en aquellos que puedan resultar más restrictivos para el flujo secundario. De esta manera podríamos comprobar si las divergencias en el secundario también son debidas (en parte o totalmente), a las tolerancias de fabricación.

Por último, podría realizarse un modelo computacional en el cual apareciesen, además del propio eyector, las líneas de alimentación y los distintos encajes y accesorios que existen en el sistema del laboratorio, llegando hasta los puntos donde se mide la presión. De esta forma se intentaría reproducir la estación real y determinar los efectos de medir la presión en un sitio u otro, aunque éste modelo sería seguramente muy grande geométricamente hablando, por lo que su simulación tendría un coste muy elevado.

Más allá de intentar validar o desmentir las hipótesis del presente trabajo, también se podrían realizar otros estudios con enfoques algo diferentes.

Una idea, siguiendo en la línea de lo que acabamos de comentar, sería hacer un estudio computacional donde se fuesen cambiando varios parámetros geométricos del eyector, ésta vez sin obedecer a ninguna tolerancia de fabricación. El objetivo sería visualizar los efectos que cada parte ejerce sobre ambos flujos, sobre los puntos de bloqueo, etc. Esto nos proveería con una gran cantidad de información que sería de gran utilidad a la hora de diseñar un eyector para una pila en concreto, pues podríamos optimizar su geometría para que trabajase en su punto óptimo al conectarse a dicha pila. Aprovechando este mismo trabajo también podría resultar interesante modificar la geometría del difusor, cambiando su longitud y ángulo de salida, para comprobar si se mejora la convergencia de algunas simulaciones, y si dejan de aparecer las anomalías que veíamos en el apartado 8.4.

Otra de las continuaciones más interesantes que podría tener este estudio consistiría en tratar de conseguir una mayor amplitud de presiones de salida en la tanda 3, para así poder visualizar el bloqueo del caudal secundario (P_{salida} más bajas), y el punto donde se empieza a bloquear el caudal primario (P_{salida} más elevadas), todo en una misma gráfica. La idea sería intentar visualizar de mejor forma y en una misma gráfica los tres modos de funcionamiento del eyector (ver punto 4.4.1). Para lograrlo necesitaríamos en primer lugar establecer una presión P_2 más elevada que las que tenemos, para intentar que el bloqueo del secundario no se

produzca a presiones inferiores a 1 bar (abs.), ya que a partir de ese punto no se podrían contrastar fácilmente con resultados experimentales. Además necesitaríamos mejorar las condiciones del difusor en el modelo, para evitar encontrarnos de nuevo con los problemas explicados en el apartado 8.4.

Por último también queremos proponer realizar un estudio acerca del comportamiento del eyector cuando se añade humedad al hidrógeno, tanto en la simulación como en el laboratorio. En concreto podría resultar muy interesante observar cuan fieles a la realidad son en este caso las simulaciones, si el comportamiento se desvía mucho del que hemos visto en este estudio, y a partir de qué punto se puede experimentar condensación de ese vapor, entre otras cosas. Lograr un modelo con buena predicción computacional del comportamiento real en este caso nos pondría a disposición de empezar a hacer pruebas con el eyector conectado a una pila de hidrógeno.



Anexo A: Material experimental

En este anexo se recogen en forma de tabla todos los dispositivos utilizados en el montaje experimental del laboratorio, junto a una breve descripción de cada uno.

Nombre	Objeto	Detalles
V1, V2		Válvulas de bola de una pieza. Fabricante: Swagelok Modelo: SS-42GS4
EVP2		Válvula proporcional de 2 vías de efecto directo Fabricante: burkert Modelo: 2822 Presión máxima: 3 bar
EVP3		Válvula proporcional de solenoide Fabricante: ASCO numatics Modelo: SCXB202 Presión máxima: 4 bar
PR1		Regulador de presión manual Fabricante: OROR Modelo: BP 100 Presión máxima: 12 bar
CV1, CV2		Válvula anti retorno Fabricante: legris Modelo: 4890 13 13
P1		Sensor de presión piezoresistivo Fabricante: KELLER Modelo: PR-21 Presión máxima: 6 bar
P2, P3		Sensores de presión Fabricante: JUMO MIDAS Modelo: 401001 Presión máxima: 2,5 bar

T1,T2		<p>Termopar</p> <p>Fabricante: RS pro</p> <p>Modelo: type K</p> <p>Temperatura de -75°C hasta 250°C</p>
MFC1, MFC2		<p>Caudalímetro para gases</p> <p>Fabricante: Bronkhorst</p> <p>Modelo MFC1: F-112AC-AAD</p> <p>Modelo MFC2: F-112AC-AAA</p> <p>Caudal máximo MFC1: 30 l_n/min</p> <p>Caudal máximo MFC2: 50 l_n/min</p>
F1, F2		<p>Filtros en línea</p> <p>Fabricante: Swagelok</p> <p>Modelo: SS-6F-MM</p>

Fig. A.1 Tabla con la información más detallada de todos los accesorios utilizados en el equipo experimental.

Anexo B: Planos del eyector

En este anexo se recogen los planos hechos por Xavier Corbella Coll en su trabajo final de grado^[1] del eyector experimental que se ha usado para este trabajo, y de las distintas piezas que lo componen.

A continuación una breve descripción de cada plano, según el orden en el que aparecen:

1. Ensamblaje general del conjunto. En este caso la entrada primaria queda en el lado derecho, la secundaria debajo, y la salida en la izquierda. (Plano n° 7)
2. Cuerpo del eyector, dónde se montan el resto de las piezas. (Plano n° 2)
3. Salida. Comprende la geometría interna de la zona de mezcla y el difusor. (Plano n° 8)
4. Soporte de la tobera. El flujo primario entra a través suyo hasta llegar a la tobera. (Plano n° 4)
5. Tobera. Se conecta al resto del eyector mediante el soporte anterior. (Plano n° 9)
6. Tuerca hexagonal. Se coloca entre el cuerpo del eyector y el soporte de la tobera, de tal manera que se puede mover la tobera hacia adentro y hacia afuera. (Plano n° 6). En nuestro caso hemos operado siempre con la tobera lo más adentro posible, haciendo contacto la tuerca con el cuerpo del eyector y con el soporte, tal como se aprecia en la figura B1.

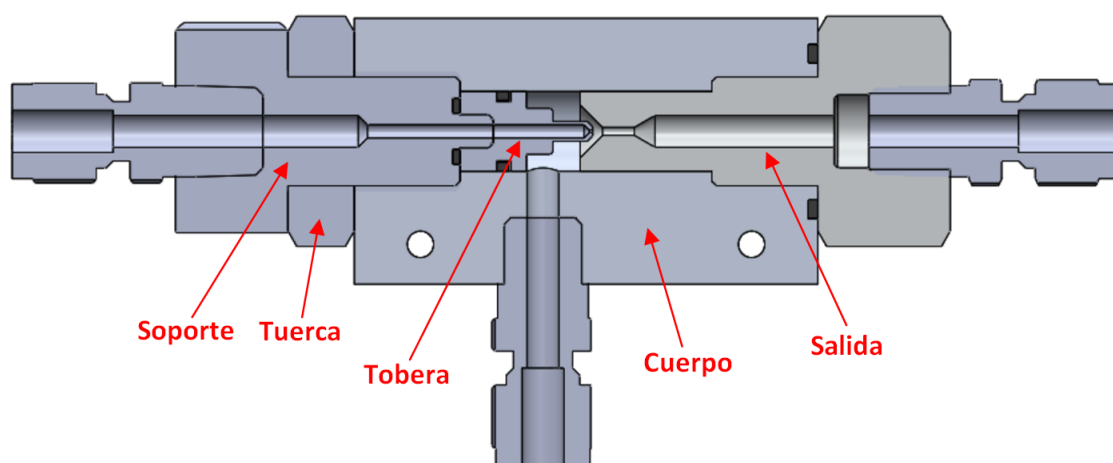
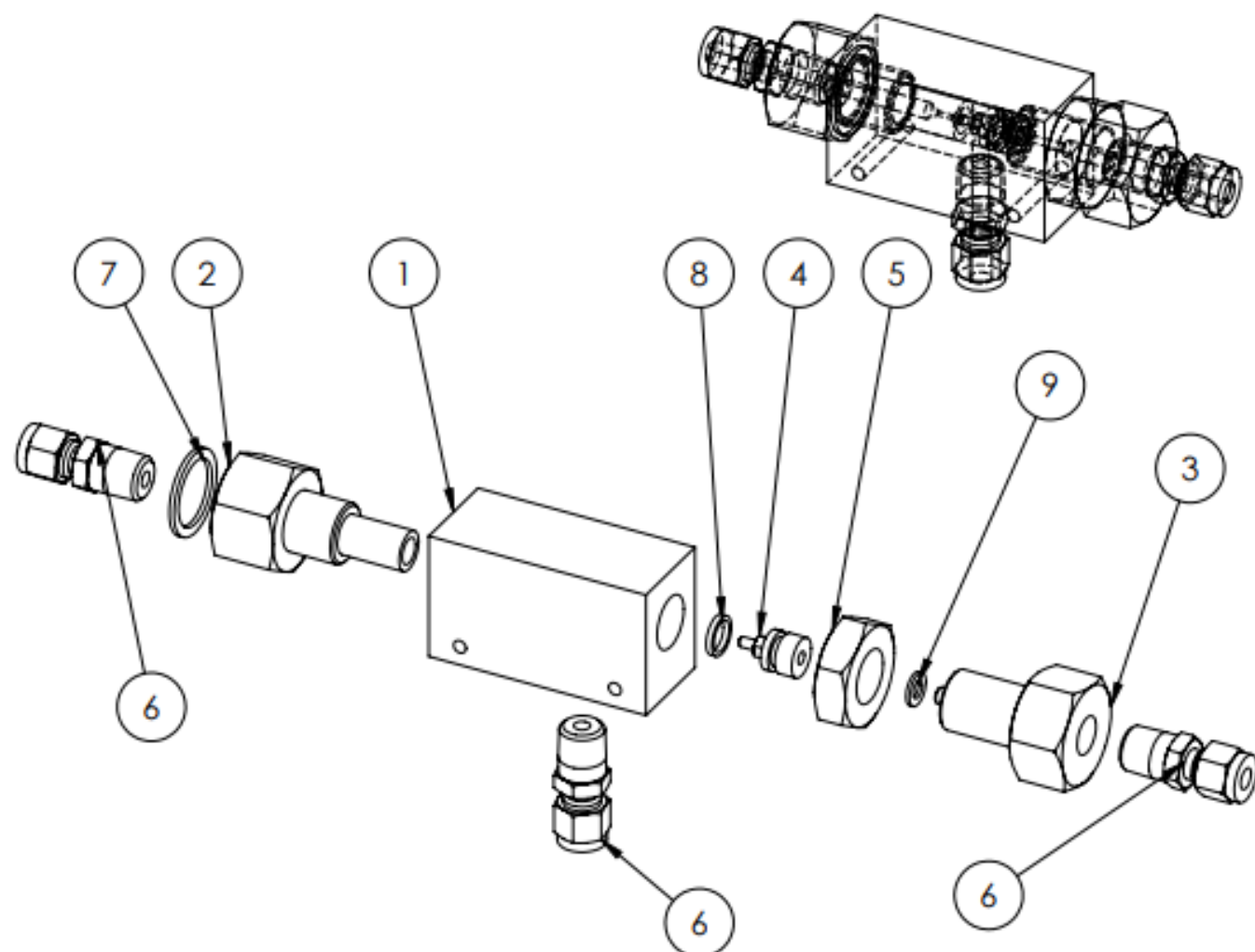


Fig. B1. Vista en sección del eyector. En rojo se muestran las distintas partes del eyector. [Corbella 2015]



Number	Name	Amount
1	Body	1
2	Outlet 2	1
3	Nozzle Support	1
4	Nozzle 2	1
5	Hexagonal Nut	1
6	Connectors SS-400-1-4	3
7	Toric Joint 1	1
8	Toric Joint 2	1
9	Toric Joint 3	1

Author: **Xavier Corbella Coll (08/05/2015)**

Checked:

Implementation and characterization of an ejector based H₂ recirculation system for a PEM fuel cell

Name of the assembly:

TS4 Ejector

Drawing nº

7

Material: **SS Type 316**

Format:

DIN A4

Scale:

1:2

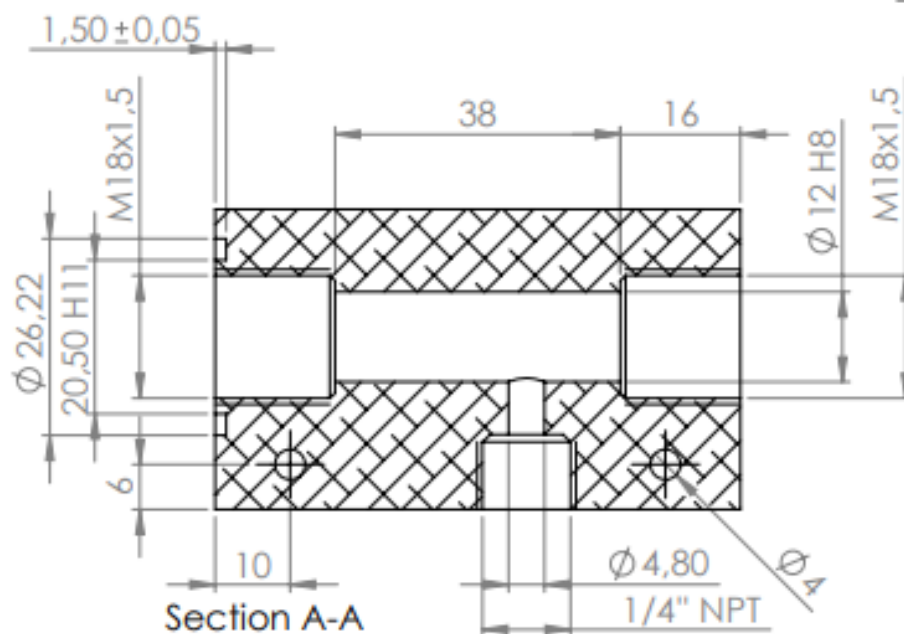
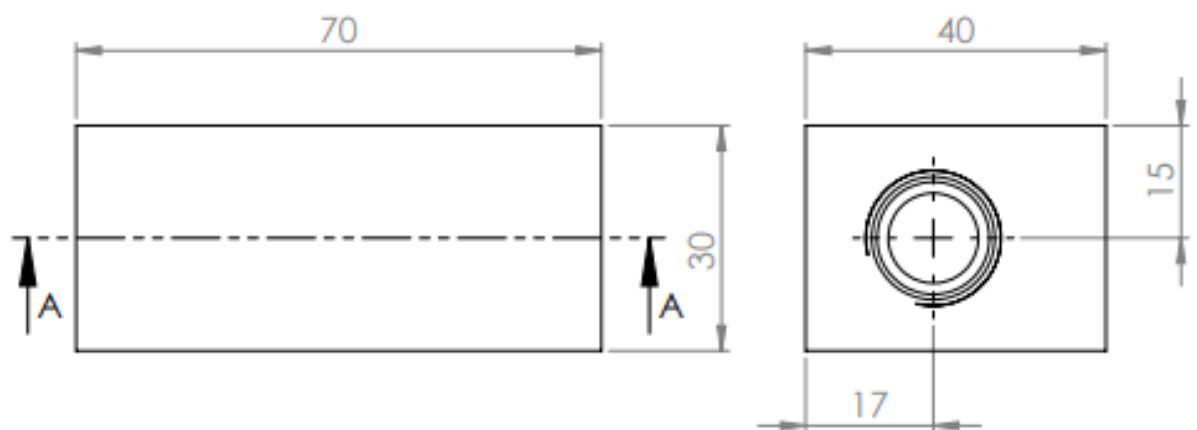
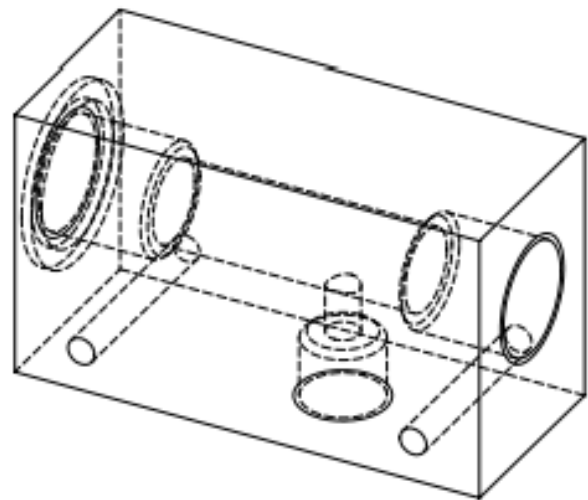
Projection:



**Edición de estudiante de SolidWorks.
Sólo para uso académico.**



Escola Universitaria d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona



General Tolerances to ISO 2768

Author: **Xavier Corbella Coll (10/01/2015)**

Checked:

Name of the piece:

Body

Drawing nº

2

Implementation and characterization of an ejector based H₂ recirculation system for a PEM fuel cell

Material: **SS Type 316**

Format:

DIN A4

Scale:

1:1

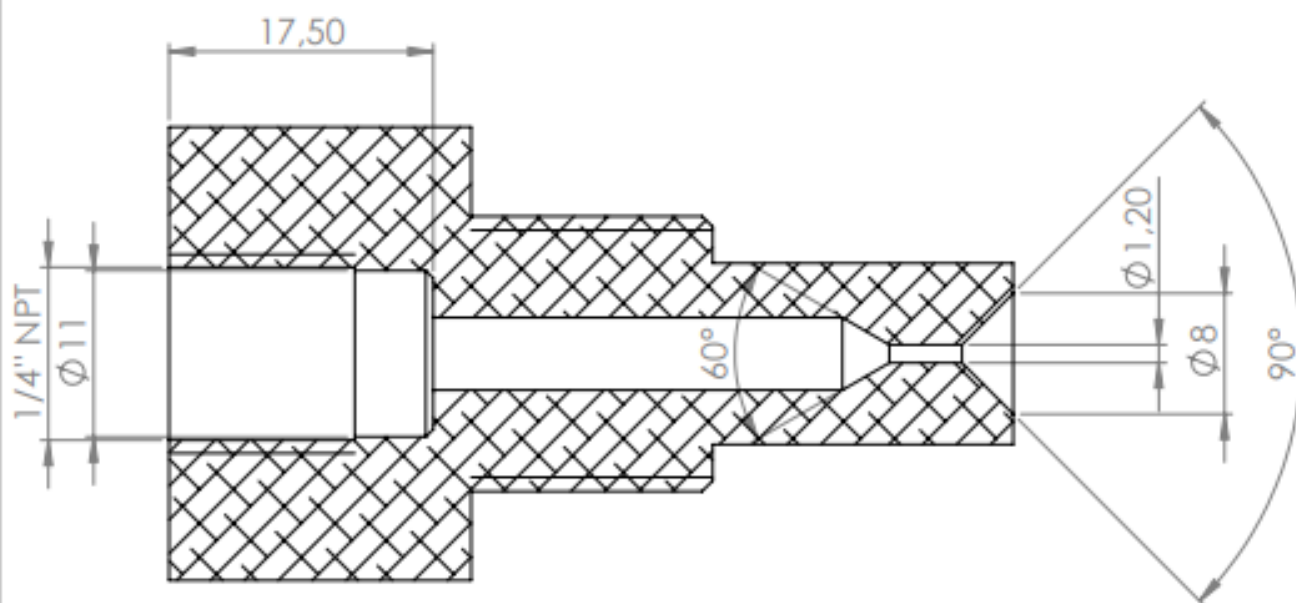
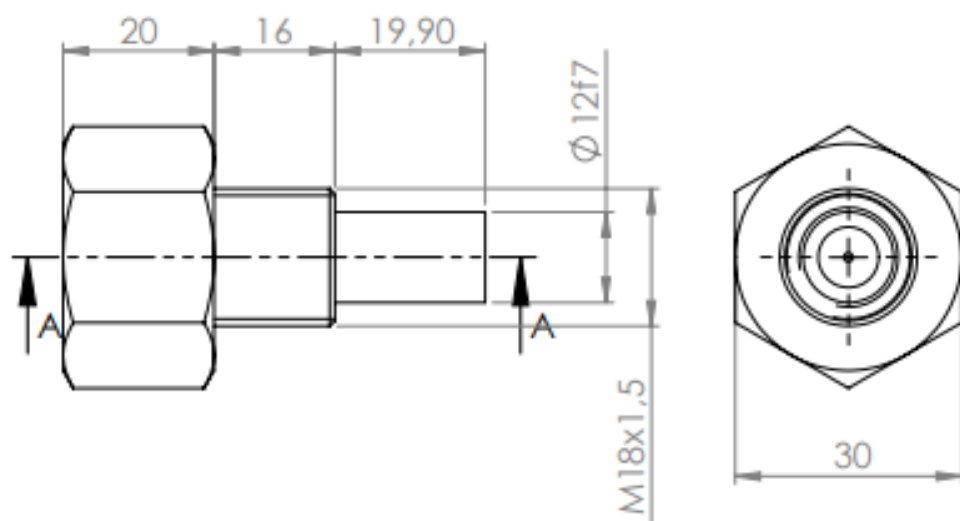
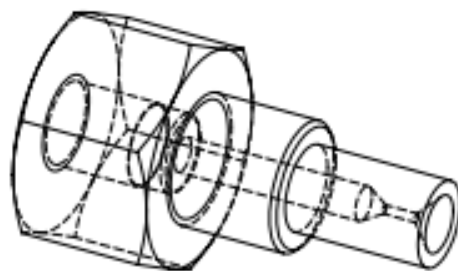
Projection:



**Edición de estudiante de SolidWorks.
Sólo para uso académico.**



Escola Universit ria d'Enginyeria
T cnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona



SECTION A-A
SCALE 2 : 1

General Tolerances to ISO 2768

Author: Xavier Corbella Coll (08/05/2015)

Checked:

Name of the piece:

Outlet 2

Drawing nº

8

Implementation and characterization of an injector based H₂ recirculation system for a PEM fuel cell

Material: SS Type 316

Format:

DIN A4

Scale:

1:1

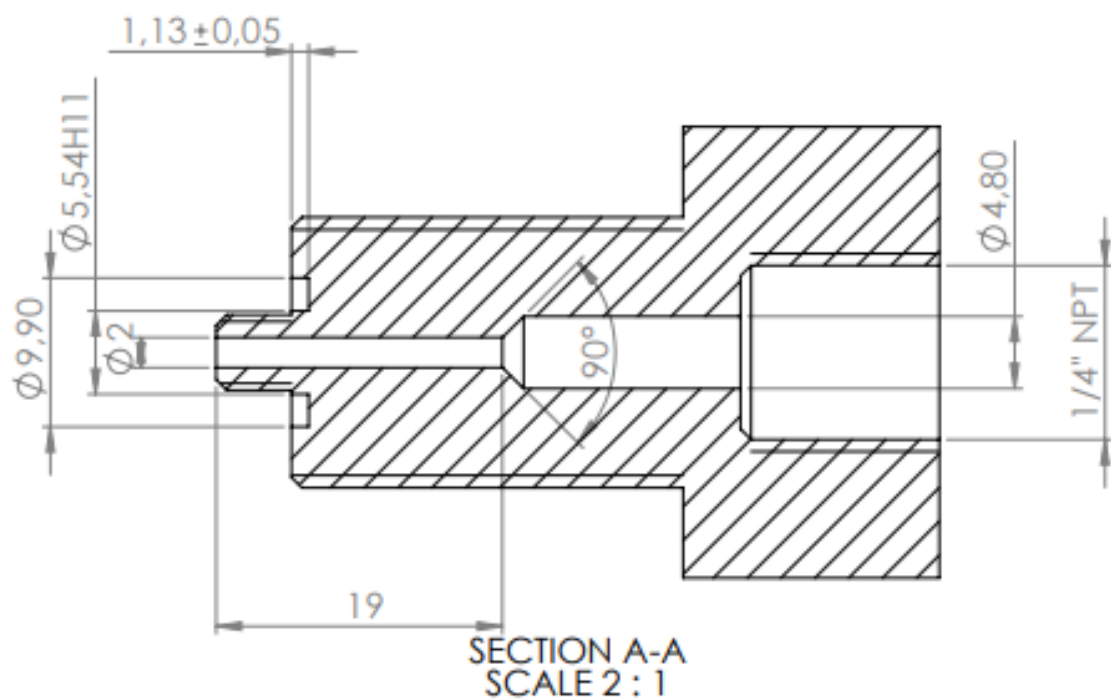
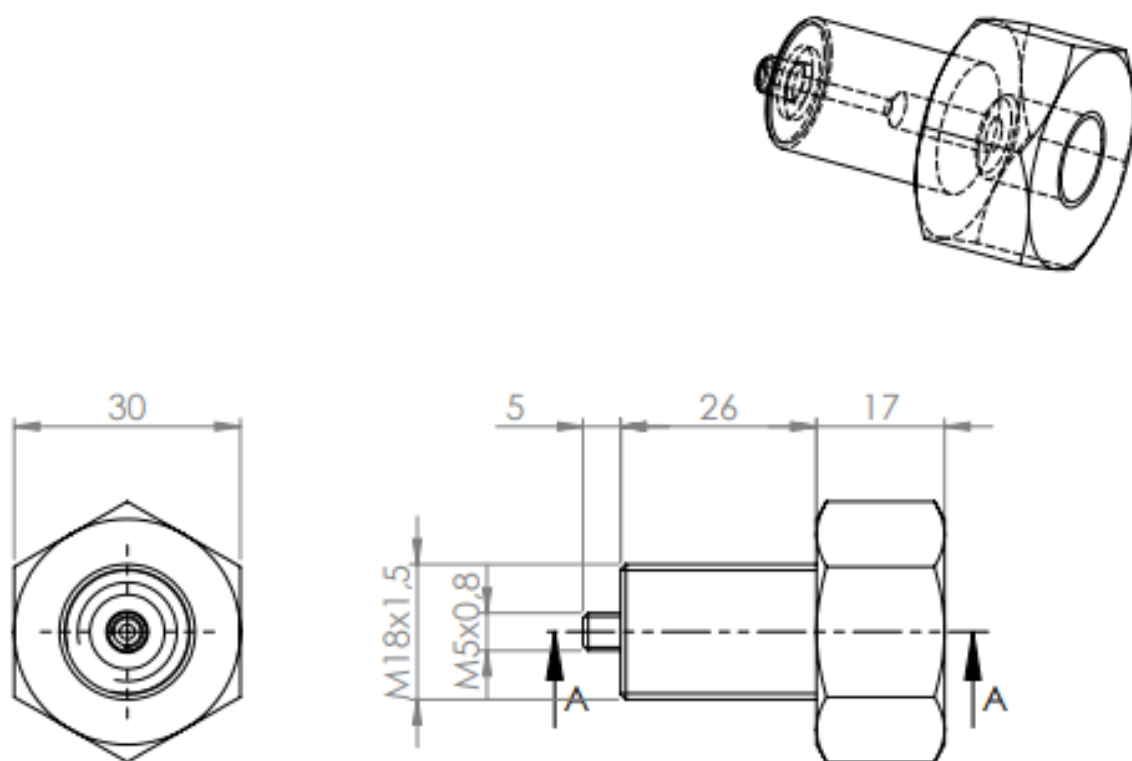
Projection:



**Edición de estudiante de SolidWorks.
Sólo para uso académico.**



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona



General Tolerances to ISO 2768

Author: **Xavier Corbella Coll (10/01/2015)**

Checked:

Name of the piece:

Nozzle Support

Drawing nº

4

Implementation and characterization of anejector based H2 recirculation system for a PEM fuel cell

Material: **SS Type 316**

Format:

DIN A4

Scale:

1:1

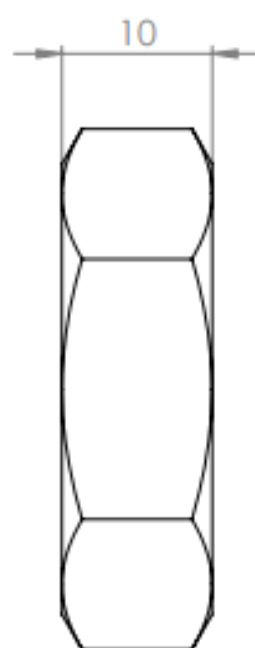
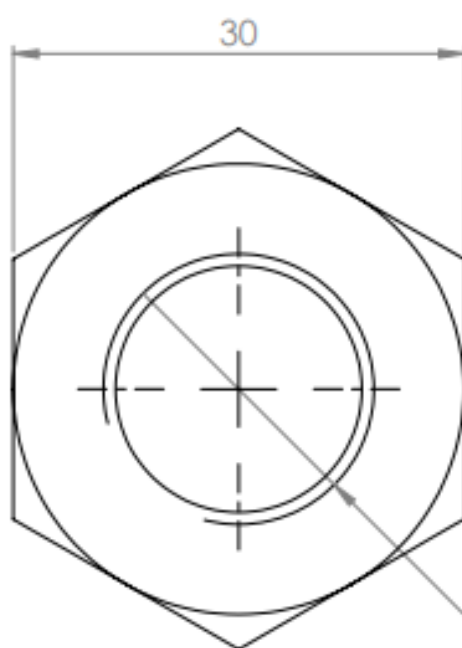
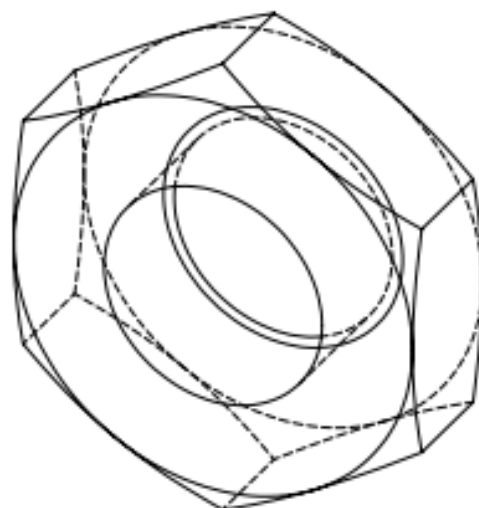
Projection:



**Edición de estudiante de SolidWorks.
Sólo para uso académico.**



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona



M18x1.5

General Tolerances to ISO 2768

Author: **Xavier Corbella Coll** (10/01/2015)

Checked:

Implementation and characterization of an injector based H₂ recirculation system for a PEM fuel cell

**Edición de estudiante de SolidWorks.
Sólo para uso académico.**



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

Name of the piece:

Hexagonal Nut

Material: **SS Type 316**

Format:

DIN A4

Scale:

2:1

Drawing nº

6

Projection:



Referencias

- [1] X. Corbella “Implementation and characterization of an ejector based hydrogen recirculation system for a PEM fuel cell”. Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- [2] L. Volpato “Experimental and computational investigation of compressible flows behavior in an ejector for anodic recirculation systems in PEM fuel cells”. Politecnico di milano, 2018.
- [3] “Fuel Cells”. www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells U.S. Fuel Cell Technologies Office.
- [4] “Fuel Cells – Hydrogen Fuel Cell Description and Advantages”. www.hydrogenics.com Hydrogenics.
- [5] D. A. Brunner, S. Marcks, M. Bajpai, A. K. Prasad, S. G. Advani. “Design and characterization of an electronically controlled variable flow rate ejector for fuel cell applications”. International journal of hydrogen energy 37 (2012) 4457-4466.
- [6] F. M. White. “Mecánica de fluidos”. 5ª edición. McGraw-Hill. 2004.
- [7] M. Kim, Y. Sohn, C. Cho, W. Lee, C. Kim. “Customized design for the ejector to recirculate a humidified hydrogen fuel in a submarine PEMFC”. Journal of Power Sources 176 (2008) 529-533.
- [8] G. Besagni, R. Mereu, P. Chiesa, F. Inzoli. “An Integrated Lumped Parameter-CFD approach for off-design ejector performance evaluation”. Energy Conversion and Management 105 (2015) 697–715.
- [9] Y. Zhu, Y. Li “New theoretical model for convergent nozzle ejector in the proton exchange membrane fuel cell system”. Journal of Power Sources 191 (2009) 510–519.
- [10] S. Elbel, N. Lawrence. “Review of recent developments in advanced ejector technology”. International Journal of Refrigeration 62 (2016) 1–18.
- [11] J. Smolka, Z. Bulinski, A. Fic, A. J. Nowak, K. Banasiak, A. Hafner. “A computational model of a transcritical R744 ejector based on a homogeneous real fluid approach”. Applied Mathematical Modelling 37 (2013) 1208–1224.
- [12] A. Hemidi, F. Henry, S. Leclaire, J. Seynhaeve, Y. Bartosiewicz. “CFD analysis of a supersonic air ejector. Part I: Experimental validation of single-phase and two-phase operation”. Applied Thermal Engineering 29 (2009) 1523–1531.
- [13] C. Li, Y.Z. Li. “Investigation of entrainment behavior and characteristics of gas–liquid ejectors based on CFD simulation”. Chemical Engineering Science 66 (2011) 405–416.